АННОТАЦИЯ

цикла научных работ «Физические основы почвенного конструирования: теория, эксперименты, инновационные материалы и технологии» доктора биологических наук, профессора кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ Смагина Андрея Валентиновича на соискание Премии имени М.В. Ломоносова.

Цикл работ посвящен фундаментальным разработкам *технологий почвенного конструирования* – инновационного направления в почвоведении и геоэкологии, позволяющего с помощью физически-обоснованных моделей природной организации почв проектировать и создавать оптимальные по своим характеристикам почвенные объекты (конструктоземы) с использованием натуральных и синтетических материалов (почвенных кондиционеров) и современных технических средств. В университетской монографии «Теория и практика конструирования почв», серии статей в рейтинговых переводных и зарубежных изданиях «К термодинамической теории водоудерживающей способности и дисперсности почв», «Physically Based Mathematical Models of the Water Vapor Sorption by Soils», «Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids», «Creation of Soil-Like Constructions», «Ionic-electrostatic model of the wedge pressure and specific surface area of colloidal systems», «Biodegradation of Some Organic Materials in Soils and Soil Constructions: Experiments, Modeling and Prevention», «Synthetic gel structures in soils for sustainable potato farming» на основе фундаментального биогеофизического подхода к количественному описанию и моделированию структурно-функциональной организации биокосных, трехфазных, полидисперсных почвенно-физических систем в потоках веществ и энергии предложена *методология технологического моделирования* для выявления оптимальных параметров слоистых почвенных конструкций на стадии их проектирования. Ноу-хау методологии состоит в слоистом способе расположения функциональных слоев конструкции, включающих один или несколько корнеобитаемых слоев с природными и синтетическими материалами для удерживания влаги, элементов минерального питания и современных средств защиты растений (СЗР) в форме гелевых структур, а также специальные подпочвенные экраны с эффектом разрыва капиллярности для «подвешивания» влаги и защитой от вторичного засоления и техногенного загрязнения. Подбор оптимальных материалов, расчет числа слоев, глубин их размещения осуществляется на базе современных софтов компьютерного моделирования энергомассообмена в системе «почва-растение-атмосфера» с использованием авторской инструментальной оценки основных гидрофизических характеристик (ОГХ), а также авторских нелинейных моделей биодеструкции органических материалов в зависимости от температуры, влажности и глубины расположения в почвенном профиле.

Теоретические разработки базовой для почвенного конструирования *структурно-функциональной термодинамической концепции водоудерживания и физического состояния* полидисперсных пористых систем почв и грунтов включают фундаментальную зависимость термодинамического потенциала и активности почвенной влаги от температуры на базе уравнения Клаузиуса-Клапейрона, положение о динамике дисперсности и водоудерживающей способности в зависимости от ранее не учитываемых мобильных факторов состава и концентрации жидкой фазы почв и температуры, альтернативные капиллярной модели представления о ведущей роли поверхностных сил и механизмов водоудерживания, устойчивости пленочной влаги с физически обоснованными моделями ОГХ и изотерм сорбции почвенной влаги на базе феномена расклинивающего давления по Дерягину, развивающая классическое уравнение Жюрена физически-обоснованная модель капиллярного подъема, с зависимостью от плотности и адсорбированной прочно-связанной влаги, феномен нелинейной зависимости осмотического потенциала жидкой фазы от влажности почв и физико-статистическая модель этого явления, альтернативные эмпирическим секущим Воронина физически-обоснованные методы оценки критических параметров физического состояния почв и грунтов по ОГХ.

Наиболее важные *методические разработки* включают комбинацию инструментального метода центрифугирования и термодесорбции почвенной влаги впервые позволившие определять ОГХ во всем диапазоне варьирования термодинамического потенциала от 0 (насыщение водой) до 0.8-1млн Дж/кг (стандартная сушка при 105 °С) синхронно с оценкой гидравлической проводимости, дисперсности (удельной поверхности), базального дыхания и кинетики биодеструкции органических веществ в зависимости от влажности и температуры, а также разработку почвенных кондиционеров нового поколения в виде устойчивых гелевых структур с наполнением акриловой полимерной матрицы амфифильными органическими компонентами (диспергированный торф, гуматы) и СЗР на основе серебра (Патент РФ №2726561).

Успешное тестирование *инновационных технологий и материалов для конструирования почв* в России, странах Персидского залива, Узбекистане в рамках инициативных грантов РФФИ (№№12-04-00528, 16-04-00284, 19-29-05006), РНФ (№№16-16-04014, 16-16-04014-П, 19-77-30012) и коммерческих российско-арабских проектов подтвердило их высокую эффективность с 1.5-3 кратным увеличением биопродуктивности растительных культур разных типов на фоне двукратной экономии влаги и надежной защиты корнеобитаемой толщи от вторичного засоления, загрязнения и патогенной микрофлоры, включая фитофтороз картофеля (грант Президентской программы РНФ 16-16-04014).

Соискатель проф. А.В. Смагин

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ

доктора биологических наук, профессора, профессора кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ Смагина Андрея Валентиновича по циклу работ «Физические основы почвенного конструирования: теория, эксперименты, инновационные материалы и технологии», выдвигаемых на премию имени М.В. Ломоносова за научные работы в 2020 г.

1.**Монография:** *Смагин А.В.* «Теория и практика конструирования почв» М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2012, 544 с.(https://istina.msu.ru/publications/book/2593365/)

Оригинальные статьи:

2. *Smagin A.V.* About Thermodynamic Theory of Water Retention Capacity and Dispersity of Soils // Eurasian Soil Sci., 2018, Vol. 51, No. 7, pp. 782–796. DOI: 10.1134/S1064229318070098 ()https://istina.msu.ru/publications/article/147663195/
3. *Smagin A.V.* Physically Based Mathematical Models of the Water Vapor Sorption by Soils // Eurasian Soil Science, 2011, Vol. 44, No. 6, pp. 659–669. DOI: 10.1134/S1064229311060135 (https://istina.msu.ru/publications/article/3132102/)
4. *Smagin A.V.* Column-Centrifugation Method for Determining Water Retention Curves of Soils and Disperse Sediments // Eurasian Soil Science, 2012, Vol. 45, No. 4, pp. 416–422/ DOI: 10.1134/S1064229312040126 (https://istina.msu.ru/publications/article/2593196/).
5. *Smagin A.V.* Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids. // Colloid Journal, 2016, Vol. 78, No. 3, pp. 391–396. DOI: 10.1134/S1061933X16030170 (https://istina.msu.ru/publications/article/21303022/)
6. *Smagin A.V.* Ionic-electrostatic model of the wedge pressure and specific surface area of colloidal systems // J. of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, Vol. 92, No. 3, pp. 744-755. DOI: 10.1007/s10891-019-01986-8.(https://istina.msu.ru/publications/article/203919477/)
7. *Smagin A.V. Sadovnikova N.B.* Creation of Soil-Like Constructions// Eurasian Soil Science, 2015, Vol. 48, No. 9, pp. 981–990. DOI:10.1134/S1064229315090100 (https://istina.msu.ru/publications/article/10715031/).
8. *Smagin A.V.*, Sadovnikova N.B., Kirichenko A.V., Egorov Yu.V., Vityazev V.G., Bashina A.S. Dependence of the Osmotic Pressure and Electrical Conductivity of Soil Solutions on the Soil Water Content // Eurasian Soil Sci., 2018, Vol. 51, No. 12, pp. 1440–1451. DOI: 10.1134/S1064229318120128 (https://istina.msu.ru/publications/article/155593990/)
9. *Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Vasenev V.I., Smagina M.V.* Biodegradation of Some Organic Materials in Soils and Soil Constructions: Experiments, Modeling and Prevention. // Materials. 2018, 11(10), 1889. pp. 1-22; DOI: 10.3390/ma11101889 (https://istina.msu.ru/publications/article/147748653/)
10. *Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Smagina M.V.* Synthetic gel structures in soils for sustainable potato farming // Scientific Reports. 2019. 9:18588 DOI: 10.1038/s41598-019-55205-8 (https://istina.msu.ru/publications/article/259955824/)

11. **Патент:** *Смагин А.В.*, Будников В.И., Садовникова Н.Б.. Смагина М.В. Гидрогелевый препарат для противопатогенной защиты почвы. Патент на изобретение RU №2726561 от 22.10.2019. Дата Госрегистрации: 14.07.2020. (https://istina.msu.ru/patents/316613820/)

Соискатель: проф. А.В. Смагин

ISSN 1064-2293, Eurasian Soil Science, 2011, Vol. 44, No. 6, pp. 659–669. © Pleiades Publishing, Ltd., 2011.
Original Russian Text © A.V. Smagin, 2011, published in Pochvovedenie, 2011, No. 6, pp. 719–730.

SOIL PHYSICS

Physically Based Mathematical Models of the Water Vapor Sorption by Soils

A. V. Smagin

Faculty of Soil Science, Institute of Ecological Soil Science, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia
E-mail: smagin@list.ru

Received July 7, 2010; in final form, November 15, 2010

Abstract—Models for the quantitative description of the water vapor sorption isotherms in soils were developed on the basis of fundamental equations of equilibrium thermodynamics and the molecular-kinetic theory of gases. The derivation of the corresponding equations, their analytical study, and real data for some isotherms of the water vapor sorption by soils of different genesis and degree of dispersion were described. The models adequately described typical S-shaped sorption isotherms in the entire range of the relative water pressure with high determination coefficients ($0.98 \le R^2 \le 1$) and statistically reliable parameters of the nonlinear regression. Along with the variable relative water content (pressure) of the water vapor in the atmosphere and the content of water in the soil, the parameters of the solid phase (specific surface), soil solution (concentration, electrolyte charges), and temperature were used as the base parameters of the models, which theoretically enable the prediction of changes in the sorption isotherms under the effect of these factors.

DOI: 10.1134/S1064229311060135

INTRODUCTION

The isotherms of the water vapor sorption by soils are basic hydrophysical characteristics describing the relationship between the relative air humidity or the relative pressure of the water vapor in the atmosphere (P/P_0) and the equilibrium water content in the soil (W). They are used for the analysis of the soil specific surface by the BET method, the derivation of structural curves for the size distribution of the micro- and mesopores and the diffusivity of the soil water, the assessment of the mechanical properties and parameters of the interphase molecular interactions, and the determination of some soil-hydrological constants [2, 3, 9, 17, 24]. The method of estimating the so-called upper part of the soil water retention curve from the sorption isotherm (**SI**) followed by its combination with the lower tensiometric segment of the curve for using this information in modern models of the mass transfer in soils [2, 3, 24] is common practice, although it is not irreproachable from the theoretical point of view. In general, SIs can be considered among the most important and solicited features of the thermodynamic state of physical soil systems. Recently developed dynamic instrumental methods of the SI determination significantly reduced the time of the analysis and improved its accuracy compared to the classical adsorption–statistical methods; they allow obtaining (instead of several experimental points) almost continuous curves of the sorption isotherms in wide ranges of the relative water-vapor pressure (concentration) of $0 \le P/P_0 \le 0.98$ (0.99) [9, 16, 17].

At the same time, it should be recognized that there are no physically based models adequately describing the S-shaped SI curve in the entire ranges of the measured P/P_0 and W in soil science until now. The known fundamental Henry, Langmuir, BET, Farrar, Hill–de Bur, Freundlich, Frumkin, and Dubinin equations are valid only for specific segments and cannot describe the entire SI curve [9, 23, 24]. The same is true for most of the proposed empirical and semiempirical models (the Speranskii, Krashennikov, Kuron, Sochevanov, Vityazev, Lykov, and Fink–Jackson equations), which are frequently inadequate to the experimental data or are restricted to a relatively narrow range of SI parameters [23]. According to Karpachevskii [6], the entire SI is best described by the polynomial $W = a_1(P/P_0) + a_2(P/P_0)^2 + a_3(P/P_0)^3 + \ldots + a_n(P/P_0)^n$, where $a_{1, 2, 3}$ are empirical coefficients. In the elaboration of this approach, Kharitonova and Vityazev [22] proposed a polynomial of the sixth degree in the form $W = k(P/P_0)^6 - m(P/P_0)^3 + n(P/P_0) + d$, which reliably approximates the SIs for different soils in a wide range of relative water-vapor pressures $0 \le P/P_0 \le 0.98$. However, the authors failed in the attempt to physically substantiate the equation, so it remains a luckily chosen empirical (regression) relationship. In addition, the sense of the free term in the polynomial (d), which practically indicates the presence of an equilibrium soil water content at the zero pressure of water vapor in the atmosphere, is not clear. It can be supposed that this is the result of the strong binding of water by the surface of the fine soil particles, but the problem of the zero water content correction for the isotherms of the water vapor sorption by the soils arises

in this case. This implies that the temperature range differentiated depending on the degree of the soil dispersion should be used instead of the standard temperature of the soil drying to the "absolutely dry" state (105°C).

A serious problem of all polynomial models is the inadequate prognosis of the SIs beyond the model's adjustment range $0 \le P/P_0 \le 0.98$ based on the empirical data. It is known from hydrophysics that the relationship between the thermodynamic potential and the soil water content in the narrow segment $0.98 \le P/P_0 \le 1$ corresponds to the main range of the soil water state from the maximum hygroscopicity to the total water capacity [9, 24]. Therefore, the SI curve analogous to this relationship should rise abruptly at a small change in the P/P_0 from 0.98 to 1. This is not the case for the polynomial models, as can be shown by the analysis of the empirical data reported by Kharitonova et al. [22, 23]. By substituting $P/P_0 = 1$ in these models, one obtains the values of the equilibrium water content close to the maximum hygroscopicity, while the theoretical values should be close to the total water capacity.

The above problems in the quantitative description of SIs defined the range of tasks of this work. The main aim was to develop adequate models for the isotherms of the water vapor sorption by soils on the basis of the fundamental concepts of the molecular physics and thermodynamics of gaseous substances. For this purpose, it would be necessary to obtain the corresponding theoretical equations of the SI models by an analytical method and to study their functional properties and potential for the description of the actual experimental data for soils of different genesis and degrees of dispersion.

OBJECTS AND METHODS

Experimental relationships between the soil water content and the relative air humidity (the relative pressure of the water vapor) obtained at about 20°C under isothermal laboratory conditions were used as the objects of the study. The corresponding SIs were determined for a series of filled samples taken from the upper horizons of soils of different genesis with regularly increasing degrees of dispersion of the soil particles (the hydrophilic specific surface area from the BET theory): (1) a sandy soddy-forest soil (7 m^2/g), the Archedino Forestry Farm, Volgograd oblast; (2) a loamy sandy soddy-podzolic soil (15 m^2/g), the Krasnogorsk Forestry Farm, Moscow oblast; (3) a sandy loamy soddy-podzolic soil (62 m^2/g), the Chashnikovo Research and Training Experimental Station of Moscow State University, Moscow oblast; (4) a loamy medium-columnar solonetz (105 m^2/g), Volgograd oblast; (5) a loamy ordinary chernozem (131 m^2/g), Voronezh oblast; (6) a clay loamy brown forest soil (153 m^2/g), Amurskaya oblast; (6) a clayey Vertisol (272 m^2/g), Tunis; and (8) a low-moor peat soil (470 m^2/g), the Chashnikovo Research and Training Experimental Station of Moscow State University, Moscow oblast.

The SIs of samples 4 and 6 were obtained using the conventional adsorption–statistical method by exposing 3–10 g soil samples in closed vacuum desiccators over saturated solutions of salts or sulfuric acid of different concentrations, which create the corresponding values of the relative air humidity (water vapor pressure) [1, 23]. The other samples (1–3, 5, 7, 9) were analyzed by original dynamic methods in the flows of a wetted and dry carrier gas with the determination of the output curves of the water vapor adsorption and desorption on an LKhM-80m gas chromatograph equipped with a thermal conductivity detector or a programmed DS1932 Hygrochron sensor of the air humidity developed in our laboratory [9, 16, 17]. To plot the SIs, the experimental data were conventionally processed using MS Excel 2003 electronic tables. The experimental data were approximated using the derived theoretical models by the least-squares method and the nonlinear regression algorithms of SigmaPlot Regression Wizard (Ver. 9). Along with the values of the nonlinear regression parameters, the program automatically estimated their variation as corresponding standard deviations, their statistical significance (difference from zero), and the main statistical parameters of the approximation (the approximation reliability R^2 and the standard deviation s).

RESULTS

Let us consider the theoretical concepts of the interaction of gases and vapors with the solid-phase surfaces of adsorbents for the quantitative description of the SIs. We start with the simplest case, when our attention is focused on the molecular properties of the adsorbate (water vapor) on the basis of the concept of the molecular interactions between the soil phases and their components developed in our works [9–11, 13, 14]. The adsorption of vapors by soils is known to differ from the adsorption of other gaseous molecules from the atmosphere or molecules and ions from solutions: it involves the formation of a new continuous phase from the vapors at the adsorbent–atmosphere interface as continuous liquid layers and microvolumes [2, 9, 24]. At the first adsorption stages under low values of the relative vapor pressure ($P/P_0 \le 0.3$–0.4), the vapor adsorption curve has a convex shape and does not radically differ from those for other substances; it asymptotically approaches a certain constant value of the adsorption determined by the capacity of the adsorption sites on the adsorbent surface with increasing P/P_0 [9, 24] (Fig. 1). The vapor adsorption follows the mechanism of individual "adsorbate–adsorbent" molecular interactions. However, when the P/P_0 value increases further, the vapor SI is not stabilized at the level of the monolayer capacity but gradually increases and acquires a convex

Approximation parameters and statistics of the data on the isotherms of the water vapor sorption by soils

Soil sample no.	Approximation parameters*	Statistical parameters		Inflection point coordinates	
		R^2	s	P/P_0	W_a
Model (5), approximation form: $W = k(P/P_0)^3 - m(P/P_0)^2 + n(P/P_0)$					
1	$n = 1.423 \pm 0.082$ $m = 2.379 \pm 0.248$ $k = 1.581 \pm 0.177$	0.994	0.015	0.50	0.31
2	$n = 3.729 \pm 0.142$ $m = 4.891 \pm 0.426$ $k = 3.751 \pm 0.306$	0.998	0.028	0.43	1.00
3	$n = 11.748 \pm 0.433$ $m = 22.190 \pm 1.316$ $k = 14.800 \pm 0.948$	0.997	0.042	0.50	2.18
4	$n = 13.886 \pm 1.576$ $m = 24.135 \pm 4.706$ $k = 18.582 \pm 3.389$	0.985	0.027	0.43	3.00
5	$n = 15.238 \pm 1.642$ $m = 24.521 \pm 4.902$ $k = 17.862 \pm 3.530$	0.988	0.031	0.46	3.55
6	$n = 22.313 \pm 2.454$ $m = 40.003 \pm 7.456$ $k = 34.678 \pm 5.374$	0.992	0.027	0.38	4.64
7	$n = 48.639 \pm 1.699$ $m = 73.998 \pm 4.991$ $k = 44.746 \pm 3.538$	0.998	0.034	0.55	11.82
8	$n = 84.706 \pm 2.563$ $m = 160.210 \pm 8.326$ $k = 108.388 \pm 6.247$	0.997	0.041	0.49	15.81
Model (13), approximation form: $P/P_0 = \exp(-n\exp(-kW))$					
1	$n = 8.536 \pm 1.259$ $k = 8.232 \pm 0.477$	0.991	0.033	0.37	0.26
2	$n = 4.420 \pm 0.272$ $k = 1.691 \pm 0.055$	0.996	0.022	0.37	0.88
3	$n = 16.568 \pm 4.549$ $k = 1.487 \pm 0.130$	0.987	0.042	0.37	1.89
4	$n = 4.811 \pm 0.506$ $k = 0.586 \pm 0.031$	0.991	0.033	0.37	2.68
5	$n = 5.218 \pm 0.794$ $k = 0.543 \pm 0.039$	0.984	0.045	0.37	3.04
6	$n = 3.882 \pm 0.187$ $k = 0.299 \pm 0.009$	0.997	0.019	0.37	4.54
7	$n = 16.106 \pm 4.683$ $k = 0.291 \pm 0.025$	0.983	0.050	0.37	9.57
8	$n = 13.370 \pm 2.468$ $k = 0.189 \pm 0.013$	0.991	0.034	0.37	13.75
Model (15), approximation form: $P/P_0 = \exp(-n(W)^{-b})$					
1	$n = 0.027 \pm 0.011$ $b = 2.675 \pm 0.332$	0.967	0.064	0.25	0.23
2	$n = 0.728 \pm 0.060$ $b = 2.010 \pm 0.216$	0.968	0.065	0.22	0.70
3	$n = 11.960 \pm 4.254$ $b = 3.789 \pm 0.464$	0.977	0.056	0.28	1.81
4	$n = 7.427 \pm 2.878$ $b = 2.058 \pm 0.300$	0.951	0.078	0.23	2.19
5	$n = 20.125 \pm 13.281$ $b = 2.561 \pm 0.460$	0.942	0.085	0.25	2.84
6	$n = 9.919 \pm 2.398$ $b = 1.606 \pm 0.145$	0.980	0.051	0.20	3.09
7	$n = 1100.0 \pm 1121.7$ $b = 3.134 \pm 0.418$	0.968	0.069	0.27	8.55
8	$n = 2566.4 \pm 2316.2$ $b = 3.011 \pm 0.340$	0.974	0.057	0.26	12.33

* The parameters are reliable for the significance levels $p = 0.0001$–0.0005 (models (5) and (13)) and $p = 0.0001$–0.005 (model (15)).

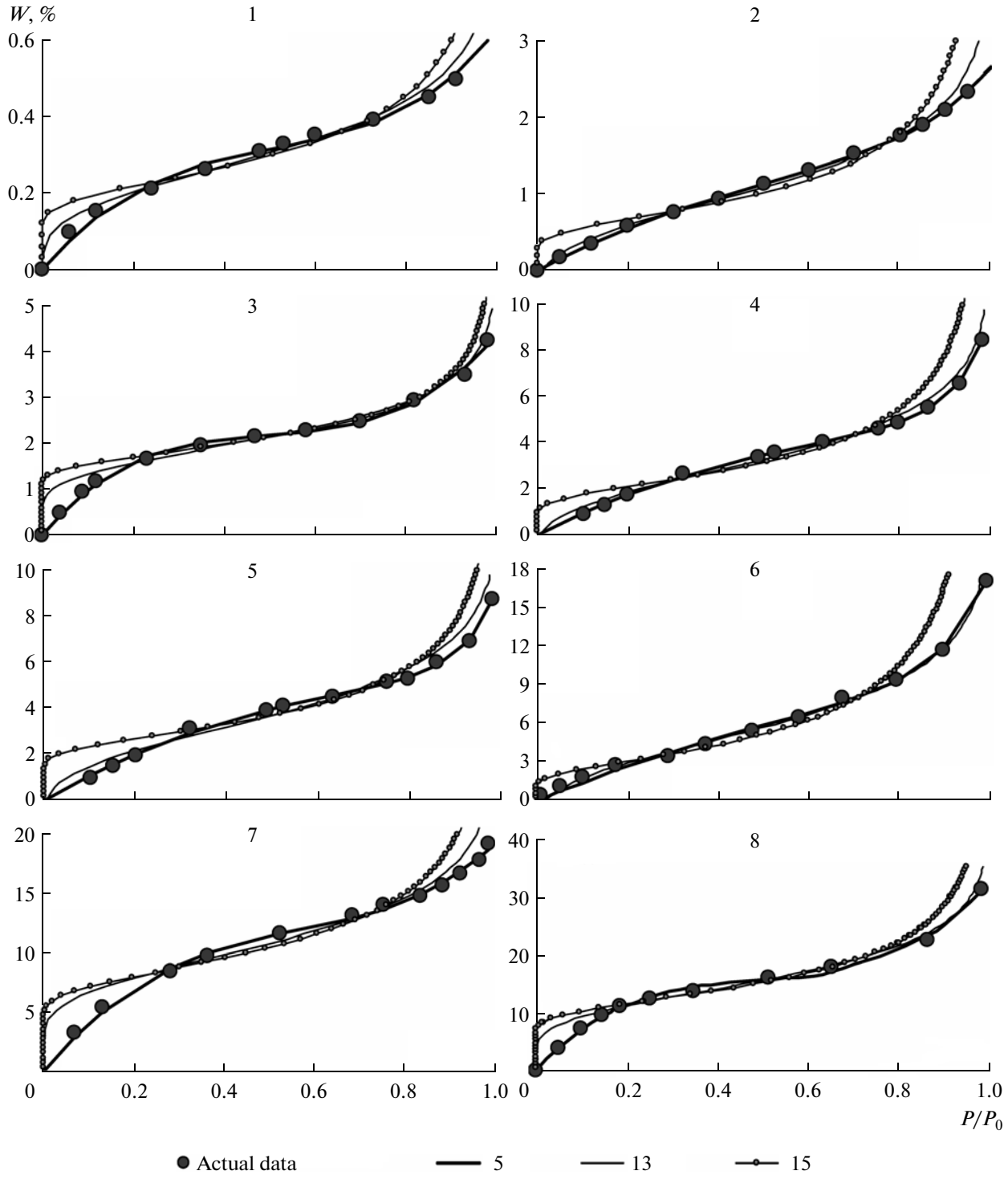


Fig. 1. Isotherms of the water vapor sorption by soils of different genesis and degrees of dispersion: (*1–8*) the numbers of the soil samples; (*5, 13*, and *15*) the numbers of the models used for the approximation of the actual data.

shape; when the P/P_0 value tends to 1, the SI rises abruptly to high values of the equilibrium water content (adsorption). This is related to the formation of a new adsorbate liquid phase on the adsorbent surface, first as a monolayer and then by the completion of the phase with water vapor molecules through adsorbate–adsorbent interactions in the field of surface forces. Thus, the vapor in the field of the surface forces of the adsorbent occurs in equilibrium with the liquid (rather than the solid) phase of the same chemical composi-

tion. Therefore, the Clapeyron–Mendeleev equation for an ideal gas is less suitable for the description of their state than other models of molecular physics, e.g., the Van der Waals equation, which accounts for the interaction of real gas molecules in the two-phase region [7]:

$$\left(P + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT, \quad (1)$$

where $V_m = V/N$ is the molar volume, N is the number of moles, P is the pressure, T is the temperature, R is the universal gas constant, and a and b are the van der Waals parameters reflecting the interactions between the vapor molecules. The parameter a accounts for the attraction of the molecules due to the intermolecular interaction and the related increase in the pressure. The constant b characterizes the effective final volume of the molecules or the repulsion forces between them at short distances. Therefore, a real gas (vapor) under high external loads more strongly resists compression than an ideal gas, which results in a decrease in its density and pressure. In general, Eq. (1) shows that the molecular attraction forces act at low gas densities, and repulsion forces act at high gas densities; therefore, the relationship between the real gas (vapor) pressure and its density (concentration of molecules) is uncertain and can result in either an increase or decrease in P. Such a relationship well agrees with the experimental studies of the intermolecular interactions of real gases and their compression [7].

The general form of such relationships can be found from Eq. (1) [15]. After the substitution of the molar volume by the inversely related value of the vapor concentration ($C = N/V$) and simple algebraic transformations, we obtain the following equation:

$$P = \frac{abC^3 - aC^2 + CRT}{1 - bC}. \quad (2)$$

It is known that the adsorbate pressure (P) primarily determines the adsorption value in any models of interphase interactions in gaseous substances [9]. At a first (linear) approximation, the simplest law of interphase distribution can be used: the Henry model, according to which the concentration of the adsorbate (the soil water content W) should be directly proportional to the vapor pressure (P):

$$W = K_g P, \quad (3)$$

where K_g is the Henry constant.

As was noted above, in distinction from the traditional concepts, we do not consider in this case the properties and characteristics of the adsorbent (soil) surface and focus our attention on the description of the adsorbate (water vapor) as a real gas (vapor), whose pressure in the field of the surface forces becomes different from that of an ideal gas due to the concentrating of the molecules and can be described by Eq. (2). Combining Eqs. (2) and (3) and normalizing the variable C to the maximum concentration C_0, we obtain the following physically based equation of the SI:

$$W = \frac{k\left(\frac{C}{C_0}\right)^3 - m\left(\frac{C}{C_0}\right)^2 + n\left(\frac{C}{C_0}\right)}{1 - r\left(\frac{C}{C_0}\right)}, \quad (4)$$

where $k = K_g abC_0^3$, $m = K_g aC_0^2$, $n = K_g C_0 RT$, $r = bC_0$.

When the molecular interaction parameter (b) in the Van der Waals equation for the water vapor is on the order of 10^{-5} m^3/mol, the denominator in Eq. (4) should not significantly differ from 1 for the major range of C_0 between ~1 mol/m^3 (saturated water vapor) and 10^3 mol/m^3. Only for liquid water with a molar concentration of $\approx 0.6 \times 10^5$ mol/m^3 is the value of r close to 1. Therefore, at a first approximation, Eq. (4) becomes identical to the simple polynomial model

$$W = k(C/C_0)^3 - m(C/C_0)^2 + n(C/C_0), \quad (5)$$

where k, m, and n are constants.

It should also be specified that, for a real gas (vapor), the relative concentration C/C_0 and the relative water vapor pressure P/P_0 are theoretically not equal to each other, as is the case for an ideal gas following the Clapeyron–Mendeleev equation. However, we shall follow the tradition of soil physics and retain the notations on the SI plots $W(P/P_0)$ using them for the approximation of Eqs. (4) and (5).

A peculiar feature of the obtained models is the possibility of the accurate analytical estimation of the SI inflection point, which some authors relate to the beginning of condensation (the appearance of a continuous liquid phase) or the maximum adsorption water capacity of soils [2, 9, 22]. In the simplest case, it can be defined as the zero second derivative of Eq. (5):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{m}{3k}. \quad (6)$$

Substituting the value of C/C_0 at the inflection point into the initial equation (Eq. (5)), we find the water content in the state of the maximum adsorption water capacity (W_a) according to Voronin [2]:

$$W_a = \frac{m}{3k}\left(n - \frac{2m^2}{9k}\right). \quad (7)$$

Now, we come to the alternative version of the theoretical (basic) model of the SI based on the thermodynamic concepts of the soil water potential and the interphase interactions in a physical soil system [2, 9, 18, 24]. The fundamental equation for the total thermodynamic potential of the vapor (Ψ) and the equilibrated soil water has the form [2, 18]

$$\psi = \frac{RT}{M}\ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (8)$$

where M is the molar mass of water, and all the other notations are as in Eq. (1).

Expressing the relative pressure of the water vapor from Eq. (8) through the total water potential, which in turn depends on the soil water content ($\Psi_{(W)}$), we obtained a basic thermodynamic model of the SI:

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{M\psi_{(W)}}{RT}\right). \quad (9)$$

The successive differentiation of function (9) with respect to W gave the analytical expression for the inflection point of the SI as the zero second derivative:

$$\frac{M}{RT}\left(\frac{d\psi}{dW}\right)^2 = \frac{d^2\psi}{dW^2}. \quad (10)$$

The study of the potential of the basic version of the SI model (9) requires information on the functional relationship between the total potential of the soil water and the soil water content. Many similar functions known in soil hydrophysics describe the dependence $\Psi_{(W)}$ in a significantly wider range than the sorption fragment of the SI; however, most of these functions are empirical in character [3]. At the same time, the fundamental works on the aggregate stability of colloidal systems (the DLVO theory [26]), the mechanics of grounds, and the thermodynamics of the soil water [2, 4, 5, 8, 18, 19] include some theoretical relationships ($\Psi_{(W)}$) promising for the derivation of physically based SI equations. One of them is exponential in shape and was used in a number of classical works on the interaction of fine particles and the liquid phase in natural physical systems. An exponential relationship between the pressure and water content of clayey soil (compression curve) was empirically obtained by Terzaghi in the 1940s and was named the Terzaghi equation later on [5, 28]. The fundamental works of Deryagin and Landau on the theory of the aggregate stability of disperse systems date to the same period; in these works, the exponential shape of the ion-electrostatic component of the wedging pressure as a function of the distance (h) between the surfaces of the fine particles interacting through the electrolyte solution was theoretically based on the Poisson law for the electric potential and the Boltzmann distribution for the ions of the electric double layer [4, 8]. The general form of the Deryagin equation for the ion-electrostatic component of the wedging pressure in the CI system can be written as follows [11, 26]:

$$P_{(h)} = BC_\ell \exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right), \quad (11)$$

where λ is the effective thickness of the diffuse-layer ionic atmosphere, C_ℓ is the concentration of ions in the free liquid phase, and B is a parameter depending on the surface electric potential (φ_0) and its shielding by counterions. The maximum value of the parameter B for the strongly charged surface of dispersed particles ($\varphi_0 > 100$ mV) is equal to $64RT$; a significant shielding of the surface charge by counterions occurs in this case, and the wedging pressure no longer depends on the electric potential. For low-charged surfaces ($\varphi_0 \ll 100$ mV), a quadratic relationship between φ_0 and B is observed: $B \approx 4\varphi_0^2 F^2z^2/(RT)$, where F is Faraday's number, and z is the ion valence [26]. At the maximum theoretical value of the electric potential $\varphi_0 = 4RT/(Fz)$, the B value again becomes equal to $64RT$. According to the Debye–Hückel theory of strong electrolytes, the value of λ for monoionic forms is determined from the ratio $\lambda = \sqrt{RT\xi_0\xi/2C_\ell F^2z^2}$, where ξ_0 is the electric constant, and ξ is the dielectric constant of the dispersion medium (liquid phase).

After Deryagin and Landau, the ion-electrostatic interactions were analyzed by Verwey, and Overbeek and Childs [8]; thus, the theory of the stability of disperse systems based on the comparison of these interactions with the van der Waals forces of molecular attraction was named the DLVO theory after Derjaguin, Landau, Verwey, and Overbeek.

In Russian soil hydrophysics, Sudnitsyn was the first who studied the exponential relationship between the thermodynamic potential (pressure) of the soil water and the soil water content; he not only reported numerous examples of agreement between the experimental data and this relationship but also theoretically substantiated it on the basis of the exponential Boltzmann distribution for ions of the electric double layer [18, 19]. In distinction from the above works on the DLVO theory, Sudnitzyn used some simplifying presumptions: the absence of interaction between the soil-phase particles, the absence of a shielding effect of the counterions at high electrolyte concentrations, and a linear decrease in the electric potential with the distance from the particles' surface instead of the Poisson law, which allowed him to significantly reduce and simplify the derivation of the corresponding theoretical relationships. After the recombination of the parameters and the conversion of the units into the CI system, the Sudnitsyn [18, 19] equation can be written in the form

$$P_{(h)} = BC_\ell \exp\left(-\frac{h}{\gamma}\right), \quad (12)$$

where $B = RT$, $\gamma = RT\xi\xi_0/(qFz)$, and q is the charge on the solid-phase surface. The comparison of this equation with Eq. (11) shows their radical difference, although the Sudnitsyn equation is probably a particular case of basic Eq. (11) of the DLVO theory. Model (12) directly relates the soil water pressure to the concentration of dissolved substances (ions), while the DLVO theory, along with the increase in the $P(h)$ depending on the C_ℓ, involves the second physical mechanism of a decrease in the wedging pressure in concentrated solutions of electrolytes because of the shielding of the surface charge and the shrinkage of the electric double layer. The fundamental model (11) considers the effect

of a wide range of factors and conditions of the ion-electrostatic interphase interactions in disperse systems; therefore, we used this model in the early studies [10–12, 14, 16] dealing with the concept of the soil's physical status and in this work. To adapt model (11) to physical soil systems, the variable h reflecting the thickness of the water layers between the interacting solid-phase particles was substituted by the ratio of the water content (W) to the water density (ρ_ℓ) and the specific surface of the particles (S): $h = (W/(\rho_\ell S)$. This method was first proposed by Michurin [8] and repeatedly used in our earlier works [11–14, 17]. Using this method, we obtained a theoretical expression for the SI as a function of the variable parameters of a physical soil system: the degree of dispersion of the solid phase (S), the water content (W), the valence (z), the concentration (C_ℓ) of the electrolytes, the temperature (T), and the fundamental physical parameters (F, ξ_0, ξ, R, ρ):

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{aMC_\ell}{\rho_\ell}\exp\left(-\frac{WFz}{\rho_\ell S}\sqrt{\frac{2C_\ell}{RT\xi_0\xi}}\right)\right). \qquad (13)$$

The dimensionless value of the single empirical parameter (a) assesses how the real surface charge differs from the maximum possible charge under the given thermodynamic conditions. Theoretically, the value of a should not exceed 64, but this supposition, as well as Eq. (11), are valid only for the ideal case of two plane-parallel surfaces separated by a liquid-phase interlayer. For spherical particles, the formulas for the potentials are significantly more complex, and the parameter a includes additional constants characterizing the size and geometry of the particles [20]. The numerical values of the constant B in Eq. (11) and, hence, the parameter a in Eq. (13) can also be affected by the theoretically founded substitution of the variable W in these equations by the difference $W - W_0$, which accounts for the Stern adsorption layer (W_0) strongly fixed by surface forces in the structure of the electric double layer. Finally, model (13) suggests that the concentration of electrolytes in the soil solution is constant, which is unlikely. During the soil drying by water evaporation, the parameter C_ℓ will increase with the decreasing water content up to the precipitation of salts (the transition to the solid phase). Our studies of the C_ℓ value as a function of the water content during the mechanical removal of the water by centrifugation revealed the relatively complex (nonlinear) character of the function $C_\ell(W)$ with a maximum in the region of the maximum molecular water capacity [10]. Later on, model (13) can be complicated by accounting for the similar relationships and approaching the reality; the SI should depend not only on the basic physical properties of the solid and liquid phases but also on the methods of removing the water from the soil [11].

According to the literature data [2, 3, 8], the general form of the equation for the wedging pressure (potential) of the water in disperse systems is described by a power function with the exponent varying from 2 (ion-electrostatic interactions) to 3 (molecular forces). This equation corresponds to the semiempirical Campbell model [27] in the foreign soil-hydrophysical literature, which was also used in this work to determine the function $\Psi_{(W)}$:

$$\psi_{(W)} = \psi_e\left(\frac{W}{W_s}\right)^{-b}, \qquad (14)$$

where W_s is the saturation moisture (an analogue of the total water capacity), and Ψ_e and b are empirical parameters, which have a physical sense in some studies (the air entry potential, the specific pore volume distribution, etc.).

The substitution of Eq. (14) into the basic model (9) gave the following SI equation:

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{M\psi_e}{RT}\left(\frac{W}{W_s}\right)^{-b}\right). \qquad (15)$$

The use of criterion (10) allowed determining analytical expressions for the inflection point on the SI in each model version. For version (13), the critical water content at the singular point of the SI is found as follows:

$$W_a = \frac{\ln(aMC_\ell/\rho_\ell)\rho_\ell S}{Fz}\sqrt{\frac{RT\xi_0\xi}{2C_\ell}}. \qquad (16)$$

In this case, the critical value of P/P_0 for any SI becomes a fixed constant numerically equal to $\exp(-1) \sim 0.37$, which does not depend on the linear transformations (13), including the introduction of the adsorption layer parameter ($W_0 \neq 0$). This artifact remains unclear from the physical point of view, although the coincidence of the value $P/P_0 = 0.37$ with the upper limit of the adsorption segment of the BET model for the SI, which is equal to $P/P_0 = 0.35$, is noteworthy. The inflection point on the vapor SI corresponds to the end of the adsorption of individual molecules and the beginning of the formation of a continuous liquid phase on the adsorbent surface, which cannot be an accidental coincidence. However, the invariance of this point for different adsorbents is difficult to explain.

For version (15), the condition of the SI's inflection has the form

$$W_a = W_s\left(\frac{M\psi_e b}{RT(1+b)}\right)^{-b}. \qquad (17)$$

In this case, the values of P/P_0 at the singular point of the SI depend on the approximation parameter (b) and are numerically equal to $\exp(-(b+1)/b)$.

Model (13) is theoretically capable of predicting the SI's response to the salinization of the liquid phase of a disperse system (an increase in C_ℓ) and the changes in the cation charges (z). The increase in C_ℓ

with all the other parameters being constant increases the equilibrium water content in the SI curves in the relative pressure region from zero to the inflection point and decreases it in the resting P/P_0 range. The increase in the cation valence (z) decreases the equilibrium water content with all the other parameters of Eq. (1) being constant. The increase in the degree of dispersion (specific surface) of the soil particles (S) unambiguously increases the content of sorbed water in the entire variation range of P/P_0. The experimental verification of these theoretical concepts apparently requires special experiments with changing one of the acting factors with all the other factors being equal. The available experimental data are insufficient to confirm or refute these concepts. Our preliminary experiments showed that salinization increased the equilibrium water contents on the SI curves for soils with light textures at the precipitation of soluble salts and the appearance of an additional hygroscopic surface. However, both parameters of Eq. (13), C_ℓ and S, apparently increased in this case, and the contribution of each parameter could not be separately determined. In finely dispersed soil-like objects (drilling sludge), salinization had an opposite effect: a decrease in the equilibrium water content [12]. However, the hydrophilic specific surface strongly decreased in this case because of the coagulation of the dispersed-phase particles under the effect of the electrolytes. Therefore, the combined effect of both the C_ℓ and S parameters was observed in this case.

The temperature factor theoretically can have a double effect on the SI. On the one hand, a rise in the temperature increases the water vapor pressure in a closed atmosphere, which should result in an adequate increase in the vapor adsorption. A similar effect is apparently included in models (4), (5), and (13), where the RT value is in the numerators of the expressions for the equilibrium water contents (W and W_a). At the same time, a rise in the temperature results in an increase in the kinetic energy of the adsorbate molecules and, hence, the rate of their desorption from the surface of the dispersed particles. This is reflected in both the basic form of the thermodynamic model for the sorption isotherm (9) and its derivative version (15), where RT is included in the denominator. Future more thorough studies obviously should take into consideration the potential effect of the temperature on the solubility of the electrolytes, the density of the liquid phase and the water vapor in the atmosphere, the parameters of the intra- and interphase molecular interactions, and other parameters of the proposed models. In particular, the Henry constant in model (4) in principle should also be inversely proportional to the temperature and account for the temperature dependence of the saturation vapor pressure, which is known to be nonlinear and significantly exceeds the contribution of the RT factor in the numerator of Eq. (4).

The effect of the temperature on the sorption isotherm was insufficiently studied at the experimental level; from the available information, the rise in the temperature unambiguously decreases the equilibrium water content in heavy textured soils and sediments [4, 21]. However, this conclusion still cannot be expanded to all soils with account for their genesis and degree of dispersion. In addition, it can be related to the methodological shortcomings of the experiment, e.g., no direct control of the water-vapor pressure dynamics in a closed atmosphere depending on the temperature, or the predominant study of the SI desorption branch rather than the adsorption branch.

Thus, the lack of experimental data at the current stage of study makes impossible the verification of the theoretical concepts behind the model about the effect of the above factors and their combinations on the SI curves. Therefore, the criterion of fitting the functions $W(P/P_0)$ or $P/P_0(W)$ and the experimental data for the studied series of soils of different genesis and degrees of dispersion was selected as the only quality parameter of the proposed model versions.

Let us consider the results of this comparison. The experimental data for the SIs of the water vapor by the studied soil samples (closed circles) and the approximation curves for the different theoretical models of the SIs proposed in the work are shown in Fig. 1. The approximation parameters and the necessary statistical indices are given in the table. From the analysis of the graphical and tabulated data, a conclusion can be drawn that the best agreement with the actual data was observed for two model versions: the polynomial (5) and double exponential (13) ones. They were characterized by the lowest standard errors of the approximation (no higher than 0.02–0.04 P/P_0 units) and steady high coefficients of determination in the range of 0.983–0.998. The statistical parameters of the approximation for version (15) using the power function $\Psi_{(W)}$ were worse. The values of s varied in the range from 0.05 to 0.09; i.e., they were almost double those for models (5) and (13), and the values of R^2 were in the range of 0.94–0.98. The visual analysis of the approximation curves showed than model (15) usually strongly overestimated the values of the equilibrium water content on the SI in the region of low water vapor pressure $P/P_0 < 0.2$ (0.3) and in the rang of capillary condensation at $P/P_0 > 0.8$. Another property of concern of this model was the low critical P/P_0 values corresponding to the SI inflection points. They varied from 0.2 to 0.28 P/P_0 units, while their values for versions (5) and (13) approached the center of the relative pressure range $P/P_0 = 0.37$–0.50. The localization of the critical P/P_0 values of the inflection points in the center of the relative pressure range was confirmed by many experimental studies of water vapor SIs in soils and sediments [2, 4, 6, 22, 23].

The best agreement with the experimental data was found for the bisexponential version (13) of the thermodynamic model. This version has the maximum

interpretation potential with consideration for the fundamental dependence of the SI on the parameters W, S, and z. However, the attempts to perform the corresponding calculations from the experimental data revealed a number of problems and discrepancies. The numerical estimation of the parameter a in model (13) showed a significant (by 4–10 times and more) excess of the theoretically possible value (64) for highly charged surfaces. The possible reasons for such an excess as related to the underestimation of the effect of the particle size, the presence of the adsorption layer in the structure of the electric double layer, and other factors were discussed above. The calculations also gave high equilibrium concentrations of electrolytes C_ℓ in the soil solution, which varied from 150 to 2000 mol/m^3 (0.15–2 mol/l) for bivalent ions ($z = 2$). At the average molar mass of 100 g/mol, they corresponded to a very high salt content in the solution (15–200 g/l). This is unlikely for soils, even with account for the increase in the soil solution concentration under drying to the air-dry state. The total water capacity usually exceeds the hygroscopic moisture by no more than 10 times, and the wetting of the soil and dilution result in this case in high values of the salt content equal to 0.2–2 g/l, which are typical only for saline soils. Besides, such high concentrations of electrolytes should result in very high values of the electrical conductivity, even in the dried state, which is not observed in reality [8]. According to experimental studies [25], the depression of the electrical conductivity with the increasing concentration of the solution is observed at C_ℓ values of about 10 mol/l; in our case, the concentrations were lower than 2 mol/l, and the maximum values of the electrical conductivity should be expected. This result of the C_ℓ calculation from the experimental data still remains unclear.

Note that for more realistic C_ℓ values of 1.5 mol/m^3 (electrical conductivity of about 1 dS/m), the specific surfaces of the soils studied, with all the other parameters being stable, should decrease by 5–8 times. In this case, they will vary from 1 m^2/g (sandy soddy-forest soil) to 40 m^2/g (peat). These values are typical for the estimation of the specific surface by the water adsorption rather than by nitrogen adsorption [6]. It is not clear whether they can be used instead of the characterization of the hydrophilic surface.

In formal terms, polynomial (5) was found to be the most adequate model in the range of $0 < P/P_0 \le 0.98$ common for the SIs. We first proposed it for coarsely dispersed soils with low adsorption potential [15]. However, the analysis of a representative set of soils of different genesis and degrees of dispersion performed in this work showed that model (5) can be also successfully used for the description of SIs of not only sands but also other soil objects. The theoretical problems related to the interpretation of the experimental data are similar to those described above. The calculated values for the van der Waals parameters of molecular interactions a and b differ by several orders of magnitude from the known tabulated values for water vapor, when the saturation vapor concentration C_0 is used as the normalizing value. To bring the calculated values in line with the tabulated ones, it is necessary that the value of C_0 be close to the molar concentration of liquid water; however, it is still not clear whether this substitution is justifiable and how the theoretical value of C/C_0 in van der Waals models (4) and (5) matches with the experimental values of the relative air humidity.

As was noted above, another problem of the polynomial model is the impossibility of the adequate prognosis of SIs beyond the range of $0 \le P/P_0 \le 0.98$, in distinction from thermodynamic models (13) and (15). At the same time, the initial version (4) is free from this shortcoming and can describe an abrupt increase in the soil water content when the relative pressure of the water vapor tends to 1. The results of predicting the SI of the loamy sandy soddy-podzolic soil (sample 2) in the range of $0.98 \le P/P_0 < 1$ by different versions of theoretical models are shown in Fig. 2. It can be seen that the complete model version based on the van der Waals equation for the molecular interactions, in distinction from reduced analogue (5), is highly competitive with the thermodynamic models (13) and (15) has the capacity to predict the abrupt increase in the water content in the narrow range of $0.98 \le P/P_0 < 1$ corresponding to the region of liquid, mobile water.

In conclusion, it should be noted that the two most adequate and promising versions of the fundamental models for the SIs are based on different theoretical concepts. One version (model (4) or (5)) was derived using the van der Waals equation for real gases and vapors with account for the intermolecular interactions. The other version (model (1)) is based on the concepts of the thermodynamic theory of the soil water potential and the Clapeyron–Mendeleev equation for an ideal gas, which was used to derive basic equation (8) according to Voronin [2]. The mathematical expressions of models (4) and (13) are also different. Nonetheless, their results for the qualitative and quantitative description of the actual (experimental) data for the SIs of the representative set of soils of different genesis and degrees of dispersion were found to be very similar. In our opinion, this is not chance, because the van der Waals forces of the intermolecular interactions are of electrical nature, as well as the electrostatic potential of the electric double layer on the surface of the soil particles. Knowledge of this physical nature will contribute to the development of a unified theory of the interphase interactions in soils and sediments, which is necessary for solving the applied problems of managing their water-retention and water-adsorption capacities, their technological properties, and their fertility.

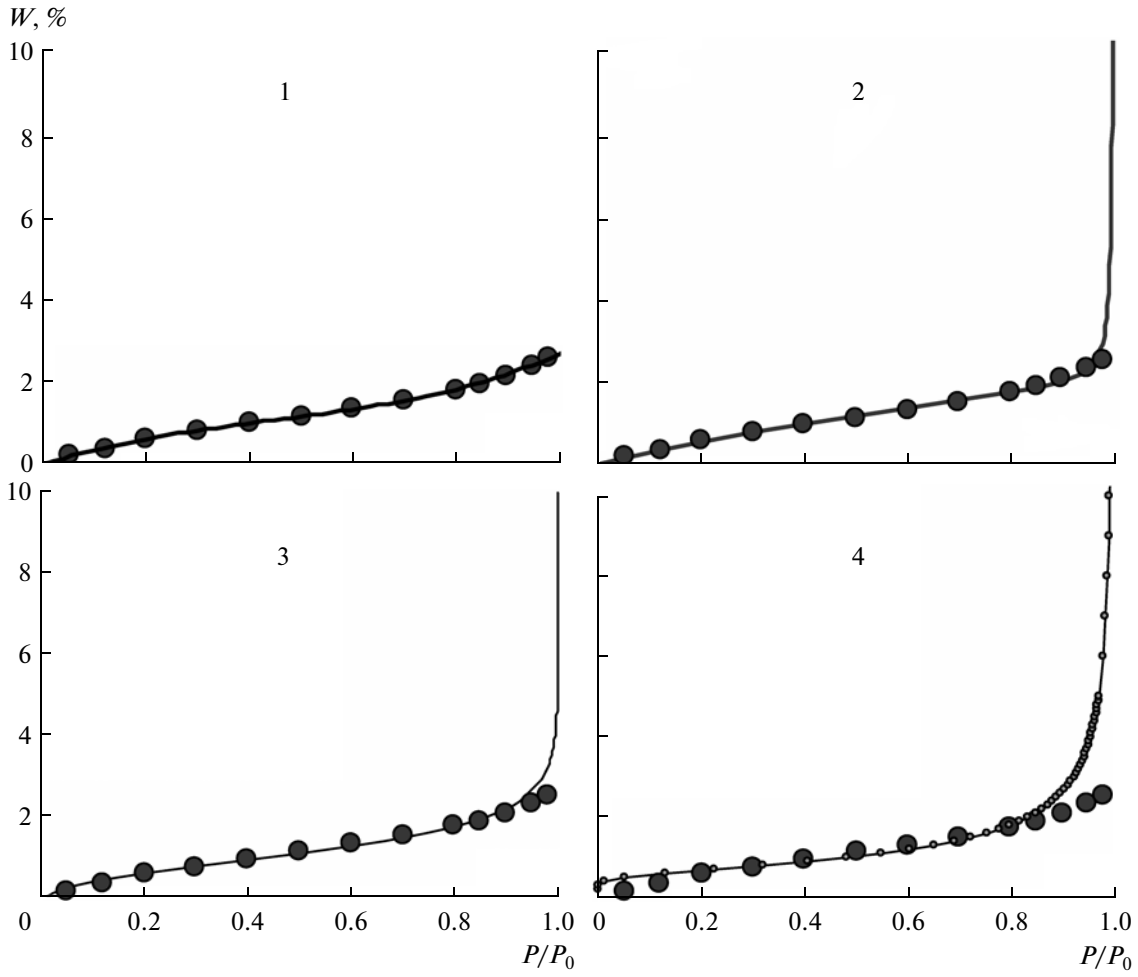


Fig. 2. Prognostic potentials of different SI models: (*1*) model (5); (*2*) model (4); (*3*) model (13); (*4*) model (15); model (4)'s parameters: $k = 0.850$; $m = 3.583$; $n = 2.760$: $r = 0.998$.

CONCLUSIONS

(1) Theoretically based models were developed for the quantitative description of the equilibrium SIs of water vapor by soils.

(2) The model version based on the Van der Waals equation for the molecular interactions of gaseous substances and the thermodynamic model based on the equation for the electrostatic component of the soil water wedging pressure most adequately described the experimental data of the SIs. This can be indicative of the common electric nature of the adsorbate–adsorbate and adsorbate–sorbent interactions in the physical systems under study.

(3) The SI as a function of the dispersion parameters (the specific surface) of the soil solid phase and the concentration and composition of the liquid phase (the electrolytes of the soil solution) was first substantiated at the theoretical level.

(4) The reduced version of the molecular interaction model in the form of a polynomial of the third degree for the function $W(P/P_0)$ was found to be the most suitable for the simplified description of the SI in a wide range of relative water vapor pressures $0 \le P/P_0 \le 0.98$.

(5) The empirical estimation of the model parameters having a physical sense frequently results in significant differences from their theoretical values, which points to the complexity of describing the sorption of water vapor by soils and the insufficient knowledge of the numerous controlling factors.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 509-04-00929-a), the program of basic research Biological Resources of Russia of the Division of Biological Sciences of the Russian Academy of Sciences, the program of the presidium of the Russian Academy of Sciences Biological Diversity, and the Moscow Government (state contract no. 8/3-66p-10/11).

REFERENCES

1. A. F. Vadyunina and Z. A. Korchagina, *Methods of Studying the Physical Properties of Soils and Sediments* (Vysshaya Shkola, Moscow, 1973) [in Russian].
2. A. D. Voronin, *Structural and Functional Hydrophysics of Soils* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1984) [in Russian].
3. A. M. Globus, *Soil-Hydrophysical Support of Agroecological Mathematical Models* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987) [in Russian].
4. M. N. Gol'dshtein, *Mechanical Properties of Sediments* (Stroiizdat, Moscow, 1973) [in Russian].
5. M. N. Gol'dshtein, *Mechanical Properties of Sediments* (Stroiizdat, Moscow, 1979) [in Russian].
6. L. O. Karpachevskii, *Physics of Surface Phenomena in the Soil* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1985) [in Russian].
7. A. N. Matveev, *Molecular Physics* (Vysshaya Shkola, Moscow, 1981) [in Russian].
8. S. V. Nerpin and A. F. Chudnovskii, *Soil Physics* (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
9. A. V. Smagin, *Soil Gas Phase* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 2005) [in Russian].
10. A. V. Smagin, "Soil-Hydrological Constants: Physical Sense and Quantitative Estimation on the Basis of Equilibrium Centrifugation," in *Role of Soils in the Biosphere: Proceedings of the Institute of Ecological Soil Science, Moscow State University,* No. 6, 37–63 (2005).
11. A. V. Smagin, "Theory and Methods of Evaluating the Physical Status of Soils," Pochvovedenie, No. 3, 328–341 (2003) [Eur. Soil Sci. **36** (3), 301–312 (2003)].
12. A. V. Smagin, "Ecological and Physical Principles of the Remediation of Finely Dispersed Soil Objects," Ekol. Vestn. Sev. Kavkaza **5** (3), 5–21 (2009).
13. A. V. Smagin, "Experimental Assessment of the Energy Parameters of Molecular Interactions in Soils," Kolloidn. Zh. **70** (4), 515–519 (2008).
14. A. V. Smagin, A. S. Manucharov, N. B. Sadovnikova, et al., "The Effect of Exchangeable Cations on the Thermodynamic State of Water in Clay Minerals," Pochvovedenie, No. 5, 551–557 (2004) [Eur. Soil Sci. **37** (5), 473–478 (2004)].
15. A. V. Smagin and N. B. Sadovnikova, *Effect of Strongly Swelling Polymer Hydrogels on the Physical Status of Light Soils* (MAKS-PRESS, Moscow, 2009) [in Russian].
16. A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, M. V. Glagolev, and A. V. Kirichenko, "New Instrumental Methods and Portable Electronic Means for Controlling the Ecological State of Soil and Adjacent Environments," Ekol. Vestn. Sev. Kavkaza **2** (1), 5–17 (2006).
17. A. V. Smagin and G. V. Smirnov, "Gas Chromatography in the Determination of the Sorption Isotherms of Water Vapor by Soils," Pochvovedenie, No. 9, 155–158 (1991).
18. I. I. Sudnitsyn, *Soil Water Movement and Water Supply of Plants* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1979) [in Russian].
19. I. I. Sudnitsyn, *New Methods of Assessing the Water-Physical Properties of Soils and Water Supply of Forest* (Nauka, Moscow, 1966) [in Russian].
20. Yu. G. Frolov, *Course of Colloidal Chemistry* (Khimiya, Moscow, 1989) [in Russian].
21. D. D. Khaidapova, "Effect of Temperature on the Desorption of Water in Clay Loamy Light Chestnut Soil," in *Proceedings of the Conference "Soil Physics and Problems of Ecology," Pushchino, 1992* (Pushchino, 1992), p. 112 [in Russian].
22. G. V. Kharitonova and V. G. Vityazev, "Isotherms of Water Vapor Sorption by Soils," Pochvovedenie, No. 4, 446–453 (2000) [Eur. Soil Sci. **33** (4), 388–395 (2000)].
23. G. V. Kharitonova, A. S. Manucharov, A. V. Smagin, et al., *Adsorption of Water Vapor by Soils and Soil Aggregates* (Grif, Tula, 2009) [in Russian].
24. E. V. Shein, *Curse of Soil Physics* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 2005) [in Russian].
25. V. V. Shcherbakov, "Electrical Conductivity of the Water Solutions of Electrolytes," in *All-Russian Junior Scientific Forum 'A Step to the Future,' Moscow, 2009* (Moscow, 2009) [in Russian].
26. E. D. Shchukin, A. V. Pertsov, and E. A. Amelina, *Colloidal Chemistry* (Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1982) [in Russian].
27. G. S. Campbell, *Soil Physics with BASIC* (Elsevier Sci., 1985).
28. K. Terzaghi and R. B. Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice* (New York, 1948).

ISSN 1064-2293, Eurasian Soil Science, 2012, Vol. 45, No. 4, pp. 416–422. © Pleiades Publishing, Ltd., 2012.
Original Russian Text © A.V. Smagin, 2012, published in Pochvovedenie, 2012, No. 4, pp. 470–477.

SOIL PHYSICS

Column-Centrifugation Method for Determining Water Retention Curves of Soils and Disperse Sediments

A. V. Smagin

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia
Institute of Ecological Soil Science, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia
E-mail: smagin@list.ru

Received July 27, 2010; in final form, July 26, 2011

Abstract—A new instrumental method was proposed for the rapid estimation of the water-retention capacity of soils and sediments. The method is based on the use of a centrifugal field to remove water from distributed soil columns. In distinction from the classical method of high columns, the use of a centrifugal force field stronger than the gravity field allowed reducing the height of the soil samples from several meters to 10–20 cm (the typical size of centrifuge bags). In distinction from equilibrium centrifugation, the proposed method obtained an almost continuous water retention curve during the rotation of the soil column only at one–two centrifuge speeds. The procedure was simple in use, had high accuracy, and obtained reliable relationships between the capillary-sorption water potential and the soil water content in a wide range from the total water capacity to the wilting point.

DOI: 10.1134/S1064229312040126

INTRODUCTION

The soil water retention curve (SWRC) is a universal basic state parameter of a physical soil system, which is widely used in the mathematical simulation of water, heat, and solute transfer in soils and landscapes [3, 4, 16]. Its experimental determination is performed under equilibrium thermodynamic conditions with the use of special equipment and methods for the separation of the soil water from the solid-phase matrix. The most common methods are based on the withdrawal of water under vacuum (tensiometry, capillarimetry, tensiostats) or its extrusion (with a membrane press) at increasing pressure on the other side of a porous membrane separating the water from the stationary solid phase of the soil sample [3, 4, 6, 12, 14, 16]. These methods are quite labor- and time-consuming if the conditions of the thermodynamic equilibrium are adequately maintained [13]. Moreover, each of them covers only a segment of the SWRC rather than the entire function of the matrix (capillary-sorption) potential in the natural variation range of the water content. The specific conditions (a highly decreased or increased pressure of the soil moisture) used in these methods rarely have analogues in natural environments (with a probable exception for the quasi-equilibrium root uptake of water or vacuum drainage).

Tensiometric methods act only in a relatively narrow range of absolute soil water pressure up to 0.7–0.8 atm, while its value can exceed 5–10 atm under actual conditions of soil drying; therefore, the simulation of the liquid-phase mass transfer in hydrophysics frequently faces the problem of insufficient data on the SWRC. The conventional solution of this problem by the combination of the tensiometric segment of the SWRC with its sorption segment, which is obtained by the hygroscopic method of liquid–vapor phase equilibrium, cannot be considered methodologically correct, because it joints the lines of the matrix and total potentials of the soil water. Even if it is granted that such joining is formally possible with consideration for the effect of the nondissolving volume (a decrease in the osmotic pressure with the drying of the soil), a significant part of the SWRC in the region of the absolute matrix potential from 1 to 20 atm remains undetermined.

The use of the thus obtained SWRCs in hydrophysical models most frequently cannot describe the actual moisture conditions without preliminary adjustment, which essentially involves the empirical fitting of the models. Some authors relate this to the large-scale (the variability of the hydrophysical properties) or kinetic (nonequilibrium) effects and attempt to unify the procedure of the data acquisition, e.g., using pedotransfer functions, and complicate the hydrophysical models themselves [2, 4, 12, 13, 16–19]. Along with these studies, the experimental methods of the SWRC's assessing can be improved, and the presented work deals with this field of study. It is based on the classical approaches to the assessment of the water-retention capacity of soils.

In the early 20th century, Lebedev, the founder of Russian hydrophysics, proposed two independent methods (the high-column method and centrifugation) for the determination of the so-called maximum

molecular water capacity of soils [5]. Later on, Dolgov and Rode with researchers from the Dokuchaev Soil Science Institute used these methods to study the water-retention capacity and the rupture of the capillary bonds in soils [7]. In elaboration of Lebedev's ideas and some subsequent studies performed in Russia (Moscow State University and the Dokuchaev Soil Science Institute) and abroad (Rothamsted), we developed and introduced a version of the equilibrium centrifugation method for obtaining SWRCs [11, 14]. This work used the theoretical basis of the above study, as well as an original idea of combining the classical method of gravity columns with centrifugation to separate water from the solid-phase soil matrix. This allowed obtaining the first almost continuous SWRC in wide ranges of soil water contents and matrix pressures (potential) of the soil moisture during one–two centrifugation cycles with a constant rotation speed.

OBJECTS AND METHODS

In the centrifugation method, which was the prototype of this project, water was removed from the sample under the effect of centrifugal force. The developed pressure on the liquid phase (P) can be determined from the equation [11]

$$P = \frac{\rho_\ell \omega^2}{2}\left(R_2^2 - R_1^2\right), \quad (1)$$

where ω is the rotation speed, ρ_ℓ is the liquid's density, R_1 is the distance from the rotation axis to any point of the sample beginning from its upper boundary, and R_2 is the distance from the rotation axis to the free surface of the removed liquid or the lower point of the sample.

The construction of the centrifuge frequently involves an inclined position of the sample with respect to the rotation axis; therefore, a correction factor $\cos\alpha$, where α is the angle between the horizontal and the central symmetry axis of the sample, should be included in Eq. (1). For the horizontal rotor spider, $\alpha = 0°$ and $\cos\alpha = 1$. For low speeds of the centrifuge, the gravity component of the pressure ($P_g = -gh\sin\alpha$, where h is the sample's height, and g is the acceleration of gravity) should be taken into consideration. The rotation speed (ω) is calculated from the number of centrifuge revolutions per minute (N) using the equation $\omega = \pi N/30$, where $[\omega] = s^{-1}$. The final equation for determining the absolute values of the soil water pressure (the matrix potential ψ_m) depending on the centrifugation parameters for a distributed sample (soil column) has the following form [10, 11, 14]:

$$P[\text{kPa}] = \psi_m[\text{J/kg}] = 0.0055N^2(R_2^2 - R_1^2)\cos\alpha + gh\sin\alpha, \quad (2)$$

where $[N]$ = rpm, $[R]$ = m, and $[h]$ = m.

An analogue of the high-column method (according to Lebedev) implemented in the centrifugal field, which is stronger than the gravity field, can be the most promising procedure for the determination of the SWRC with a centrifuge. This can reduce the size of the columns proportionally to the separation factor $F = \omega^2 R/g$), which shows by how many times the centrifugal field is stronger than the gravity field. For common laboratory centrifuges with a rotation radius of 0.1 m and a rotation speed of 500–5000 rpm, the field can be stronger by 30 to 3000 times. In this case, common centrifuge bags (about 0.1 m high) with soil moistened up to the total water capacity (TWC) can be used in place of long soil columns several meters in length [7]. Thus, an almost continuous SWRC can be obtained at a fixed rotation speed of the centrifuge by analyzing the water content of the soil in the centrifugal tube depending on the distance from its bottom during a single experiment (rather than a series of experiments). To maintain the zero capillary-sorption pressure at the lower boundary of the column, the perforated bottom of the tube should be installed on a water-soaked hygroscopic material (cotton or foam). After a characteristic time interval (2–4 h [11]), the plastic tube can be cut into fragments to determine the distribution of the water by weighing, or soil portions can be carefully removed from the top to bottom. In the longer term, sectional tubes of heat-resistant material should be used, which can be fragmented after the end of the experiment to weigh the fragments (sections) and determine the soil water content by drying.

The calculation of the soil water pressure in the distributed soil sample depending on the variable radius R_1 (which is apparently related to the sample's height h as $R_1 = R_2 - h\cos\alpha$) using Eq. (2) shows that a pressure of 1500 kPa will be created at the top of a 10-cm soil column at the maximum rotation speed of a TsLS-3 laboratory centrifuge (Russia) equal to 6000 rpm; i.e., a pressure corresponding to the wilting point can be reached (Fig. 1). At the same time, a pressure of 40–50 kPa will be observed at a distance (h) of only 2 mm from the free water surface (a 2-mm layer at the tube's bottom). A single experiment with this rotation speed can obviously be used only for studying the SWRCs of heavy soils and sediments with high water retention capacity. In sands, the distribution of water throughout the column will be almost homogeneous, because almost all the capillary water will be extruded already at 40 kPa. At the same time, a decrease in the rotation speed to 1500 rpm can create a gradient of the centrifugal field from ~3 kPa at the bottom to ~100 kPa at the top of a 10-cm soil column, which is suitable for sand SWRCs. Thus, a single centrifugal experiment with this rotation speed can determine an almost continuous SWRC in the range of 3–100 kPa, which significantly reduces the time and cost of the analysis. To obtain SWRCs in the range of higher absolute pressures between 200 and 1500 kPa, an additional experiment should obviously be performed with a sample of the same soil in a 10-cm column at the maximum rotation speed of the centrifuge (6000 rpm).

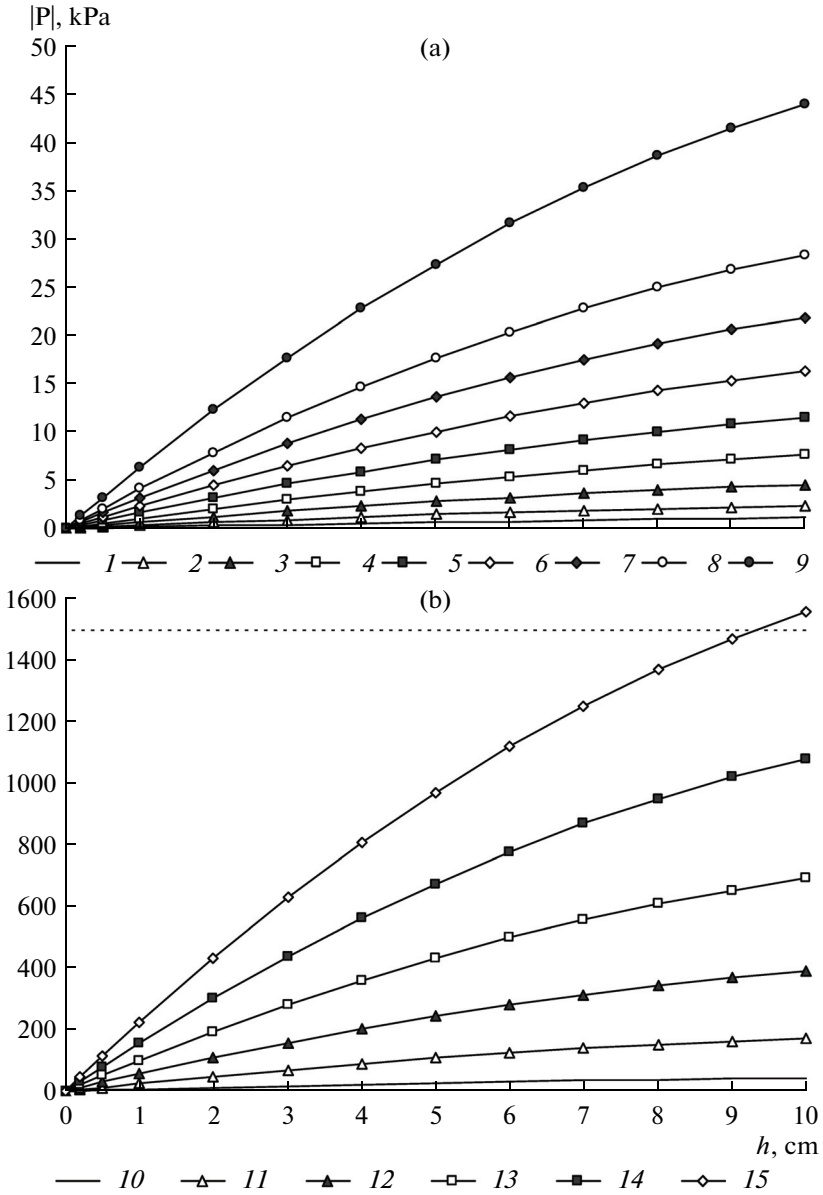


Fig. 1. Calculated curves of the soil water pressure as a function of the soil column height for a TsLS-3 laboratory centrifuge: (A) low centrifugation speeds (*1*)–(*9*): 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, and 900 rpm, respectively; (B) medium and high centrifugation speeds (*10*)–(*16*): 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, and 6000 rpm, respectively; (the dotted line) the pressure corresponding to the wilting point (1500 kPa).

Along with the drying SWRCs conventionally used in hydrophysics, this work theoretically allows obtaining the wetting branch of the SWRC (an analogue of the capillary fringe) if the soil is placed in centrifugal cells with water on the bottom and a hard spring ensuring the submersion of the lower surface of the sample into the free water at the given rotation speed [11]. The experimental study of the SWRC hysteresis thus becomes possible in a wide range of soil water pressures. In our opinion, the proposed version of the equilibrium centrifugation method will be especially promising for the information support and adjustment of water transfer models such as HYDRUS, where the SWRCs are preset in the form of the vertical water distribution in a homogeneous soil layer (column) of fixed thickness. These models describe such an equilibrium distribution identical to the SWRC's shape under the free outflow of gravity water and zero flow at the upper boundary of the profile [10, 18].

Experimental procedure. We describe the procedure for the simplest version of the method to obtain the drying SWRC with the use of a TsLS-3 centrifuge and an electronic analytical balance with an accuracy of 0.001 g. Filled or monolith soil samples were placed in preweighed centrifugal tubes 10 cm high and 1 cm in diameter with perforated bottoms. A sample was

simultaneously taken to determine the water content in the initial (air-dry or natural) state. The weighed tubes with the soil samples were installed in laboratory bakers with water and capillary fed with water from the bottom; then, water was added to the bakers to the level of the sample's surface for the complete saturation of the soil with water. After weighing, the tubes with the soil samples were installed in the laboratory centrifuge holders (four tubes per holder) with a water-wetted cotton or foam piece on the bottom. Then, the centrifuge's rotation speed was selected from plot A (Fig. 1) to obtain the SWRC in the initial pressure range corresponding to the tensiometric region (no more than 50 kPa). Some samples were centrifuged at this speed for 2 (light soils) or 4 (heavy soils) hours; then, the tubes were cut (or unscrewed) into fragments of 3–10 mm, weighed, and dried to constant weight (m_s) at 105°C. Another procedure of soil extraction is also possible: the transparent plastic tube is marked out in segments, and soil portions are carefully extracted from each depth and transferred into glass cups. From the known equation $W = 100\ (m_в - m_s)/(m_s - m_f)$, where m_f is the weight of the empty tube fragment or the cup, the corresponding values of the water content in the profile of the soil column were found [1]. Another series of soil samples was treated analogously, where the SWRC should be determined in the higher range of absolute soil water pressure up to 1500 kPa with the corresponding rotation speed being selected from plot B (Fig. 1). The plots obviously served for the approximate selection of the experimental conditions, and the exact values of the soil water pressure in the studied layers of the distributed samples (columns) were found from Eq. (2).

From the weight of the empty tube (m_0), the initial weight of the soil in the tube (m_w) at the initial water content (W_0), and the weight of the water-saturated soil in the tube (m_s), the TWC value was estimated:

$$\mathrm{TWS},\% = 100\left(\frac{m_s - 100m_w/(100+W_0)}{100m_w/(100+W_0) - m_0}\right). \qquad (3)$$

Taking into consideration that $R_1 = R_2 - h\cos\alpha$, the water pressure was calculated for the given centrifuge rotation speeds depending on the distance from the tube's bottom. These data formed an SWRC coordinate. The values on the other axis of the function were found as gravimetric the water contents (W) of the soil fragments corresponding to their height from the tube's bottom (h) (see above). Given the diameter and height of the tube's segment and the weight of the soil fragment after drying, the soil density can be easily determined, and the gravimetric water content can be converted to the volumetric water content if necessary.

The proposed procedure was tested using three samples with different degrees of dispersion and physical states: quartz glass sand, soil from the A (20- to 30-cm) horizon of a loamy ordinary chernozem (Krasnodar region), and soil from the T (10- to 20-cm) horizon of a low-moor peat soil (Moscow oblast). The selection of the samples was performed with consideration for the sufficiently wide distribution of the corresponding soils and sediments and the possibility of estimating the water retention capacity in a wide range of water content with their use. The chernozem was sampled as a monolith; bulk samples were used in the other cases. The air-dry peat material was preliminarily wetted with a hand sprayer to remove the effect of hydrophobicity. After saturation, 16 to 32 columns for each sample were centrifuged on a TsLS-3 laboratory centrifuge with the following stages of the rotation speeds: 200, 400, 600, 2000, 3000, 4000, and 6000 rpm. Such a wide and dense range of speeds was used for methodological purposes. At each stage, two to four columns of each sample were taken and analyzed for their water content, which provided two to four replicates, respectively. SWRCs obtained by equilibrium centrifugation were available for the samples used in this work [11], as well as an SWRC obtained by the high-column method for quartz sand [4, 7]; therefore, we managed to compare the new method with those used in soil hydrophysics.

The statistical processing of the results and the preparation of the supporting data were performed using MS Excel-2003. To approximate the experimental data of the SWRC by the nonlinear van Genuhten function, RETC software (available at http://www.hydrus2d.com/) was used in the HYDRUS-1D environment for the computer simulation of the energy and mass transfer in the soils.

RESULTS AND DISCUSSION

Selected experimental results sufficient to illustrate the potential of the new method are shown in Fig. 2. The data were grouped according to the following stages of the centrifuge rotation: 200–400, 1000–2000, and 6000 rpm. For the measurements performed in four replicates, the data were averaged by pairs. It can be seen (Fig. 2) that the method gave typical SWRCs as a continuous series of points in a wide range of absolute soil water pressures from 0 to 1500 kPa for all of the studied samples. Thus, for the first time in soil science, the theoretically and practically important problem of assessing the SWRC by a single rapid method within the natural variation of the water content from the TWC to the WP was solved.

The comparative analysis revealed specific features of the samples studied. The quartz sand expectedly had the lowest water-retention capacity (from the gravimetric water content), the peat soil had the highest water-retention capacity, and the chernozem occupied an intermediate position. The comparative estimation of the differential water capacities was performed by the Voronin secant method [2], although it could be considered only as conventionally suitable for coarsely dispersed and organic substrates. Nonethe-

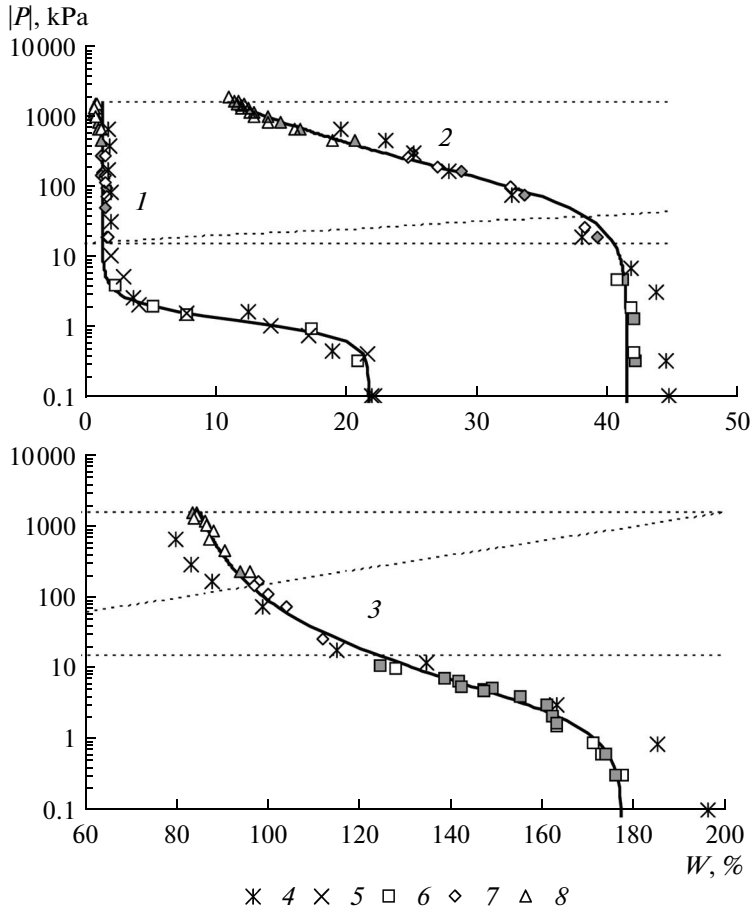


Fig. 2. SWRCs of some studied samples (the combined column–centrifugation method): (*1*) monomineral quartz sample; (*2*) loamy ordinary chernozem; (*3*) low-moor peat soil; (curves) data approximation by the van Genuhten model; (upper dotted line) WP (1500 kPA); (lower and medium dotted lines) the CW and FC, respectively (Voronin's secant method [2]); (*4*) equilibrium centrifugation [11]; (*5*) high-column method [4, 7]; centrifuge rotation stages, rpm: (*6*) 200–400, (*7*) 1000–2000, (*8*) 6000; (closed symbols) first replicate; (open symbols) second replicate.

less, the method can compare the numerical values of the so-called soil-hydrological (energy) constants marking the changes of the water-retention mechanisms in soils as manifestations of some physical (gravity, capillary, or surface) forces [2, 16]. The TWC values were close to 180% for the peat, exceeded 40% for the chernozem, and exceeded 20% for the sand. The values of the capillary water (CW) and field capacity (FC) were almost equal in the mineral samples: 1.5–2% in the sand and 38–40% in the chernozem. For the peat, the FC (95%) was significantly lower than the CW (125%). The WP values regularly increased with the increasing degree of dispersion and the content of organic matter in the samples from ≤1% in the sand to 11–12% in the chernozem and 85% in the peat soil. The obtained range of the values well agreed with the available quantitative estimates of these parameters for the studied classes of physical soil objects [7, 15, 16].

After the recalculation of the gravimetric water content to the volumetric water content, the SWRC data were approximated by the van Genuhten function most frequently used in the current foreign models of energy and mass transfer [16]. The approximation revealed good agreement between the actual SWRC data obtained by the new method and the above model with the parameters θ_r (the residual water content), θ_s (the saturated water content), α (the reciprocal of the bubbling pressure), and n (the function exponent) (Table). It can be seen that the maximum possible estimates of the approximation significance $R^2 = 0.99$ were reached for all of the studied samples at low standard errors of the approximation $s = 0.008–0.015$ and statistically significant model parameters. The latter varied in the ranges permissible for each of the studied sample classes according to the known international geophysical databases HYPRES and UNSODA [14]. For the loamy chernozem, only the α value controlling the SWRC slope in the near-saturation region was untypically low. In our opinion, this could be related to the use of a monolith sample obtained from a dried ped after the abundant irrigation of the soil under the field conditions. As a result, the swelled sample lost its

Parameters and approximation statistics of the SWRC data by the van Genuhten function

Object	θ_r	θ_s	α	n	s	R^2
Quartz sand	0.018 ± 0.002	0.282 ± 0.006	0.093 ± 0.003	3.720 ± 0.200	0.008	0.99
Ordinary chernozem	–	0.456 ± 0.003	0.001 ± 0.000	1.441 ± 0.014	0.008	0.99
Low-moor peat soil	0.397 ± 0.012	0.887 ± 0.020	0.036 ± 0.008	1.449 ± 0.052	0.015	0.99

granular structure and loose consistence typical of rainfed ordinary chernozems. Therefore, the pressure of the air bubbling in the sample was untypically high, and its reciprocal α in the van Genuhten equation was low. This could be seen from the shape of the SWRC, which was almost parallel to the ordinate axis up to pressure values of 10–20 kPa.

After the reverse conversion of the volumetric water content into the gravimetric water content, the continuous SWRCs calculated from the van Genuhten function were plotted in Fig. 2 with the experimental data. The visual analysis confirmed the complete agreement of the calculated and experimental data, which indicated the adequacy of the van Genuhten approximation function, on the one hand, and the potential suitability of the new method for the informational and experimental support of the current models for the transport of water and solutes in soils and porous environments, on the other hand.

The comparison of the results obtained by the new method with the physically closest data from the equilibrium centrifugation [11] and high column [4, 7] methods (denoted with cross symbols in Fig. 2) also revealed satisfactory agreement. The best agreement of the data was noted for the coarsely dispersed sand sample, and the worst agreement was observed for the organic material of the peat-bog soil. By all appearances, this was related to the probable partial compaction (shrinkage) of the swelled finely dispersed samples in the centrifugal field. In equilibrium centrifugation, 9 or 10 points on the SWRC corresponded to the same number of sample exposure stages in the centrifugal field of successively increasing intensity; therefore, the probability of compaction in this case was higher than in the new combined method with the lower number of centrifugation stages. For an organic sample, the compaction in the equilibrium centrifugation method resulted in decreasing porosity and, hence, the equilibrium water content at the same pressure as in the new method. For mineral samples with a rigid structure (sand) or initially dense monolith packing of the particles (chernozem), the additional load had no strong effect on the sample's volume (water content), but it increased the absolute matrix potential of the soil water, probably because of its localization in microcapillaries and at the surface of soil particles. Therefore, the data of the equilibrium centrifugation method in the region of the capillary and sorption moisture were located above the SWRCs obtained in the new combined method. An analogous excess in the region of saturated moisture for swelling samples *2* and *3* was apparently related to the initially different water contents. A higher excess was found in the equilibrium centrifugation method, probably because of the smaller samples (4 cm in size) and their more complete free swelling compared to the samples in the new method (Fig. 2).

The following approach was used for the visual demonstration and statistical processing of the data compared. From the van Genuhten equation with the previously determined coefficients (table), the equilibrium water content (W_1) corresponding to the matrix pressure at which the water content (W_2) was experimentally found using the known methods of the SWRC's determination was calculated for each of the studied samples. This was necessary, because the pressure values obtained in the new method usually did not coincide with those in the equilibrium centrifugation and the water distribution in the high columns. As a result, two series of equilibrium water contents corresponding to the same values of the matrix pressure were obtained; one series characterized the new method, and the other series characterized the previously known methods of the SWRC determination. The mutual correlation of these values was then analyzed with the approximation of the data by a linear equation in the form $W_2 = \alpha W_1$ (Fig. 3). At the complete coincidence of the data from the different methods, the slope of this line should be equal to one ($\alpha = 1$), as well as the coefficient of the determination ($R^2 = 1$). In our case, $\alpha = 0.97–0.99$ and $R^2 = 0.93–0.97$, which indicated a close correlation between the data compared. The standard errors of the approximation varied from 1.6–2.3% in the mineral samples to 9.2% in the organic sample, which was lower than the errors and the confidence intervals that we found earlier for the equilibrium centrifugation method [9, 11]. Thus, it can be concluded in a first approximation that the results of the new method are quite comparable with those of the known hydrophysical methods within the limits corresponding to the natural variation of the

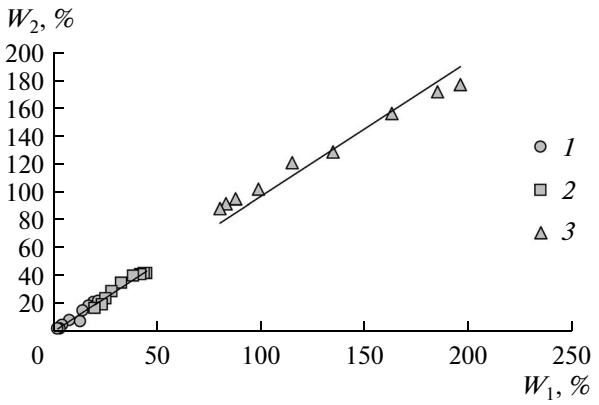


Fig. 3. Comparison of the data for the equilibrium water content from the column–centrifugation method and other methods of the SWRC's determination: (*1*) monomineral quartz sample, (*2*) loamy ordinary chernozem, (*3*) low-moor peat soil; (W_1) equilibrium water content determined by the known methods of centrifugation [11] and high columns [4, 7]; (W_2) the same for the new column–centrifugation method; the linear regression equation, coefficients of determination, and standard errors of the approximation: (*1*) $W_2 = 0.986W_1$, $R^2 = 0.97$, $s = 1.6$; (*2*) $W_2 = 0.965W_1$, $R^2 = 0.95$, $s = 2.3$; (*3*) $W_2 = 0.970W_1$, $R^2 = 0.93$, $s = 9.2$.

measured equilibrium water contents in soils and sediments.

CONCLUSIONS

(1) A fundamentally new method for the determination of SWRCs was developed that estimated the equilibrium profile distribution of the water in centrifuged soil columns of short length.

(2) The analysis is not laborious; it can be implemented on common laboratory centrifuges (TsLS-3) and allows obtaining SWRC data for 32 soil samples of no more than 10–15 g each within 4–8 h.

(3) The method can give an almost continuous SWRC in the range of the absolute capillary-sorption water content from 0 to 1500 kPa corresponding to the water content range from the FC to the WP.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the program of basic research Biological Resources of Russia of the Division of Biological Sciences of the Russian Academy of Sciences, the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences Biological Diversity, the Russian Foundation for Basic Research (project no. 509-04-00929a), and the Moscow Government (state contract no. 8/3-66p-10/11).

REFERENCES

1. A. F. Vadyunina and Z. A. Korchagina, *Methods for Studying Physical Properties of Soils* (Vysshaya shkola, Moscow, 1973) [in Russian].
2. *Opportunities in Basic Soil Science Research* G. Sposito and R. J. Reginato (Eds.) (Soil Sci. Soc Am., Madison, 1992). Translated under the Title *Vozmozhnosti sovremennykh i budushchikh fundamental'nykh issledovanii v pochvovedenii* (GEOS, Moscow, 2000) [in Russian].
3. A. D. Voronin, *The Structural–Functional Hydrophysics of Soils* (Izd. Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1984) [in Russian].
4. A. M. Globus, *Soil-Geographic Backing of Agroecological Mathematical Models* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987) [in Russian].
5. A. F. Lebedev, *Soil and Ground Waters*, (Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscow, 1936) [in Russian].
6. S. V. and A. F. Chudnovskii, *Soil Physics*, (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
7. A. A. Rode, *Soil Moisture*, (Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscow, 1952) [in Russian].
8. A. V. Smagin, *The Gas Phase of Soils* (Izd. Mosk. Gos. Univ., Moscow, 2005) [in Russian].
9. A. V. Smagin, "Theory and Methods of Evaluating the Physical Status of Soils," Pochvovedenie, No. 3, 328–341 (2003) [Eur. Soil Sci. **36** (3), 301–312 (2003)].
10. A. V. Smagin and N. B. Sadovnikova, *The Impact of Strongly Swelling Polymeric Hydrogels on the Physical State of Coarse-Textured Soils* (MAKS Press, Moscow, 2009) [in Russian].
11. A. V. Smagin and N. B. Sadovnikova, and Mizuri Maauia Ben-Ali, "The Determination of the Primary Hydrophysical Function of Soil by the Centrifuge Method," Pochvovedenie, No. 11, 1362–1370 (1998) [Eur. Soil Sci. @ @ (11), 1237–1244 (1998)].
12. I. I. Sudnitsyn, *The Movement of Soil Water and Water Supply of Plants* (Izd. Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1979) [in Russian].
13. I. I. Sudnitsyn and R. I. Zaitseva, "On the Methods of Determination of the Dependency of Soil Water Pressure on the Soil Water Content," Vestn. Mosk. Univ., Ser. 17: Pochvoved., No. 2, 18–24 (1993).
14. *Theory and Methods of Soil Physics* (Grif i K, Moscow, 2007) [in Russian].
15. S. I. Kharchenko, *Management of the Soil Water Regime on Reclaimed Lands in the Nonchernozemic Zone* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987).
16. E. V. Shein, *A Course of Soil Physics* (Izd. Mosk. Gos. Univ., Moscow, 2005) [in Russian].
17. E. V. Shein, A. V. Dembovetskii, and A. K. Guber, "Pedotransfer Functions: Determination, Substantiation, and Use," Pochvovedenie, No. 11, 1323–1331 (1999) [Eur. Soil Sci. **32** (11), 1181–1188 (1999)].
18. G. S. Campbell, *Soil Physics with BASIC* (Elsevier, 1985).
19. J. G. Wesseling, *Soil Physical Data and Modeling Moisture Flow* (Alterra, Wageningen, 2009).

SPELL: 1. Vadyunina, 2. Korchagina, 3. Voronin, 4. Chudnovskii, 5. . @ @

ISSN 1061-933X, Colloid Journal, 2016, Vol. 78, No. 3, pp. 391–396. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.
Original Russian Text © A.V. Smagin, 2016, published in Kolloidnyi Zhurnal, 2016, Vol. 78, No. 3, pp. 380–385.

Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids

A. V. Smagin

Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

Institute of Forestry, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya 21, Uspenskoe, Moscow oblast, 143030 Russia

e-mail: smagin@list.ru

Recieved May 30, 2015

Abstract—A simple and easy method based on differential drying of samples at different temperatures has been proposed for quantitative determination of the specific surface areas of colloidal disperse systems. The following fundamental dependence of moisture thermodynamic potential [Ψ] on absolute drying temperature T is used in the method: $\Psi = Q - aT$, where Q is the specific heat of evaporation and a is a parameter related to the initial temperature and relative air humidity in an external thermodynamic reservoir (laboratory apartment). Gravimetric data on moisture mass fraction W and the value of Ψ have been used to plot Polanyi potential curves $W(\Psi)$ for the studied samples. The curves have been employed to calculate the isotherms of moisture sorption. The capacity of a monolayer and the effective specific surface area have been determined from these isotherms in terms of the BET theory. The surface area estimated from the published results of classical experiments is about 1000 m^2/g. The problem of the "absolute zero of humidity," which is of great importance for determining the properties of colloidal disperse bodies normalized with respect to the solid phase mass, has been discussed.

DOI: 10.1134/S1061933X16030170

INTRODUCTION

Effective specific surface area S is one of the most frequently used quantitative parameters of dispersity. Several methods and instruments have been proposed for its determination by measuring the adsorption of different substances on the surface of examined disperse bodies [1–4]. In some cases, the S values of samples are found by comparing the amount of an adsorbed (desorbed) substance with that obtained for a reference adsorbent with a known specific surface area; however, S is, more frequently, calculated from the experimentally measured sorption isotherms (SIs) using the BET model for their approximation [1, 3, 4]. This model is believed to enable one to calculate more precisely, as compared with its prototype, the Langmuir equation, monolayer capacity W_m, i.e., the amount of a vaporous adsorbate that covers the particles of a disperse body with a monomolecular layer, for three-phase disperse systems. If parameter W_m and area s_0 per adsorbate molecule are known, it is easy to estimate required parameter S by the following formula [3, 4]:

$$S = \frac{W_m s_0 N_A}{M}, \quad (1)$$

where N_A is Avogadro's number and M is adsorbate molecular mass.

Thus, in order to estimate S it is, in most cases, necessary and sufficient to obtain the isotherm of adsorbate sorption on a studied disperse body. Excluding the expensive special equipment used for determining SIs by thermal desorption or gas chromatography [2, 4], the classical method for their measurement that involves the exposure of samples in an adsorbate atmosphere with a preset pressure (concentration) of its vapor and implies the establishment of absorption equilibrium in the adsorbent–adsorbate system appears to be most available.

In soil science and pedology, this method is referred to as "saturation over salts," because, according to this method, relative pressure P/P_0 of water vapor, which is used as an adsorbate, is preset in a closed volume of a dessicator containing a sample using saturated solutions of different salts [5]. An essential drawback of this method is its duration (1 month and more for 5- to 10-g samples) governed by the characteristic time of the establishment of sorption equilibrium. A second problem is the small number of experimental points (seldom more than two) lying in an SI range of $0 < P/P_0 < 0.3$ (0.4) that is suitable for calculating W_m by the BET method. This number is limited by the standard set of salts used in this method (lithium and zinc chlorides, $P/P_0 = 0.10$–0.15, and calcium chloride, $P/P_0 = 0.32$) [5].

At the same time, there is a theoretical possibility of an essentially different method for determining SIs and, consequently, specific surface areas. This method is based on successive drying of samples at different temperatures, weighing them at each stage, and calcu-

Table 1. Experimental data on humidity and calculated values of moisture potential and specific surface area for the examined samples of soil colloids

Sample no.	1	2	3	4	|Ψ|, kJ/kg
T, °C	W, %				
27	39.8	33.3	39.9	45.8	145
47	23.0	18.8	24.3	24.8	305
70	11.6	9.0	13.4	16.4	489
110	8.7	7.3	11.4	15.6	809
200	7.4	6.1	9.3	14.0	1529
340	3.9	3.6	6.7	4.0	2649
400	2.0	0.8	3.4	1.6	3129
500	0.0	0.0	0.0	0.0	3929
S, m^2/g	1022.3	864.6	1005.8	1157.1	

lation of the thermodynamic potential (specific Gibbs free energy) of the moisture in the atmosphere of a drying oven connected with the laboratory apartment, which maintains a constant content of water vapor in air, from the drying temperature [6]. The goal of this work is to substantiate the use of the thermogravimetric method for determining S and to show that this method can be applied for the investigation of soil colloids.

EXPERIMENTAL

The results of the classical experiments [7] on dehydration of colloids isolated from the following four Californian soils were used as the experimental data: (1) Altamont, (2) Yolo, (3) Vina, and (4) Aiken, which are attributed to Aridic Haploxerets and Mollic xerofluvents families (Table 1). Before the isolation of the colloidal fraction, soil samples were, according to [7], purified from an organic moiety, and their absorbing complex was saturated with hydrogen. Drying was carried out at temperatures T ranging from 27 to 500°C. In the calculations of humidity, the "absolutely dry" (anhydrous) state of soil colloids corresponded to sample mass after drying at the final stage at 500°C.

Numerical values of physically substantiated parameters that enter into the model used for estimating the moisture thermodynamic potential as a function of drying temperature were evaluated from the reference data on the temperature dependence of saturation vapor pressure of water in a range of $0 \le T \le 374$°C, i.e., from the state of freezing to the critical point of water.

For the same purpose, an alternative estimation was carried out from the data of a laboratory experiment implying air heating in a KD 200 drying oven (NUVE OVEN, China) with forced circulation and ventilation of air and simultaneous control over relative air humidity and temperature using DS 1923 "gigrochrone" programmed electronic sensors [8]. The statistical processing of the results was performed using the MS EXCEL 3 software.

The proposed method is theoretically substantiated as follows. Required parameter S is estimated by the common method using the approximation of the isotherms of water vapor sorption on studied samples by the BET model [3]:

$$\frac{P/P_0}{W(1-P/P_0)} = \frac{1}{W_m K} + \frac{(K-1)}{W_m K}\left(\frac{P}{P_0}\right), \qquad (2)$$

where W is the mass fraction of water (humidity, kg/kg) and K and W_m are model parameters. In the $x = P/P_0$, $y = (P/P_0)/W(1 - P/P_0)$ coordinates, the model SI has the form of $y = ax + b$ linear dependence. Approximating experimental SIs by this dependence and determining approximation parameters a and b, the required S value is easily calculated as follows [3]:

$$S = \frac{36.14}{a+b}, \qquad (3)$$

where 36.16 is the numerical expression of the combination of all constants in equation (1) for water molecules and $(a + b) = 1/W_m$.

Let us derive SIs from the thermogravimetric data using the Polanyi potential theory [1, 9]. As applied to water vapor as an adsorbate, this theory implies that the dependence between moisture thermodynamic potential Ψ and humidity $W(\Psi)$ must be invariant with respect to temperature. The thermodynamic potential is related to relative water vapor pressure P/P_0 or the value of relative air humidity, which is numerically equal to it under the ideal gas approximation, by the known fundamental equation [10]:

$$\Psi = \frac{RT}{M}\ln\left(\frac{P}{P_0}\right). \qquad (4)$$

Here, Ψ is the specific thermodynamic potential (J/kg), T is the absolute temperature (K), M is the

molar mass (kg/mol), and R is the gas constant (J/(mol K)).

The function inverse to relation (4) has the following form:

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{|\Psi| M}{RT}\right), \quad (5)$$

Having known the $W(\Psi)$ dependence, function (5) can be used to easily calculate the isotherms for specified temperature T in the form of the $W(P/P_0)$ functions.

In turn, the $W(\Psi)$ dependence may be found from the data on the drying of samples at different temperatures using the approach described in [6]. In the volume of the laboratory apartment, which is infinite, as compared with the volume of the drying oven, a constant relative pressure of water vapor or relative air humidity f is maintained at room temperature T_r. Under these conditions, air heating in the drying oven must reduce the P/P_0 value relative to the initial value of f via an increase in the denominator, i.e., saturation vapor pressure P_0. Relation $P_0(T)$ is, as a first approximation, determined by Kirchhoff–Rankin model (6), which is obtained by integrating the Clausius–Clapeyron equation under the assumption of the constancy (independence from temperature) of specific heat Q of evaporation [11]

$$\ln(P_0) = -\frac{QM}{RT} + B, \quad (6)$$

where B is the integration constant.

Having written relation (6) for two temperatures, i.e., the constant one (T_r) and an arbitrary (T), and subtracted one equation from the other, it is easy to obtain the following dependence, taking into account that, at $T = T_r$, $P_0 = P/f$ [6]:

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{QM}{RT} - \left(\frac{QM}{RT_r} - \ln f\right). \quad (7)$$

Substituting it into Eq. (4), we derive the following basic theoretical formula used in the method for calculating the thermodynamic potential as a function of the temperature upon drying the samples:

$$\Psi = Q - aT, \quad (8)$$

where $a = \{Q/T_r - (R/M)\ln f\}$ is the parameter that is governed by the conditions in the laboratory apartment.

RESULTS AND DISCUSSION

To carry out the calculations by the above-proposed scheme, let us determine the value of parameter Q in Eq. (8). Figure 1a shows the result of such direct determination performed via the approximation of the reference data [12] by Kirchhoff–Rankin equation (6). In the $y = \ln P_0$, $x = 1/T$ coordinates, the experimental data are approximated by linear regression

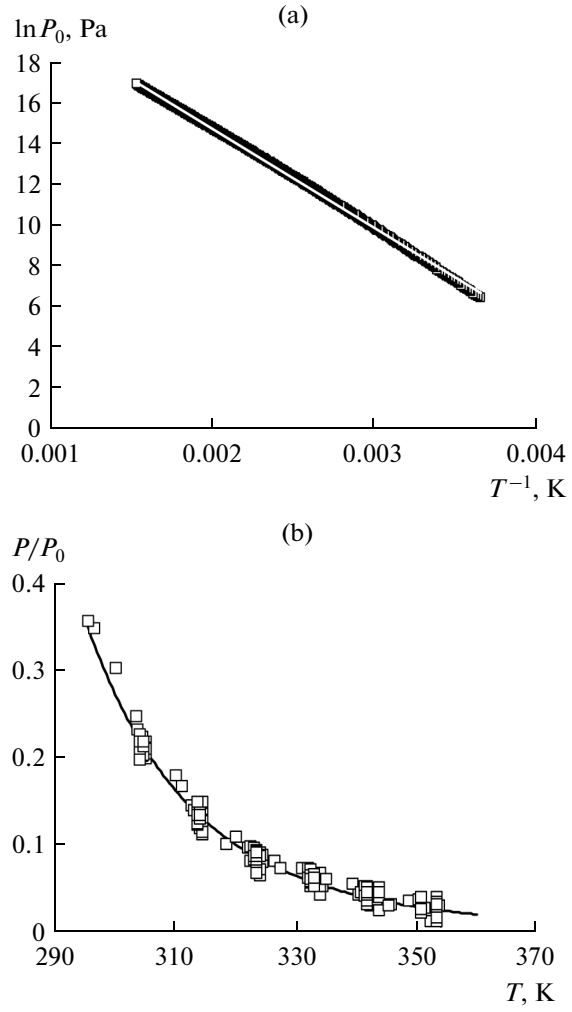


Fig. 1. Temperature dependences of saturation vapor pressure P_0 and relative air humidity P/P_0 plotted based on the data of (a) [12] and (b) laboratory experiment with air heating in the drying oven and Eqs. (6) and (7), respectively.

function $-mx + n$, where m and n are regression parameters. Values of $m = 4882.2 \pm 6.3$ and $n = 24.5 \pm 0.02$ obtained at significance level $p < 0.0001$, standard error of approximation $s = 0.07$, and correlation coefficient $R^2 = 0.999$ indicate the high accuracy of functional dependence (6). Since $Q = mR/M$, we obtain parameter value $Q = 2255 \pm 3$ kJ/kg.

The results of alternative experimental estimation from the data on the dependence of relative air humidity on the temperature (Fig. 1b) in the drying oven and their approximation by dependence (7) (equation of linear regression in the $y = \ln(P/P_0)$, $x = 1/T$ coordinates has the form of $y = 4853.8x - 17.49$, $R^2 = 0.952$) gave $Q = 2241 \pm 33$ kJ/kg. Taking into account the broader confidence interval (33 kJ/kg), this estimate may be considered to be identical to the previous one. The experiment, which was performed using DS 1923 off-line programmed sensors for automated

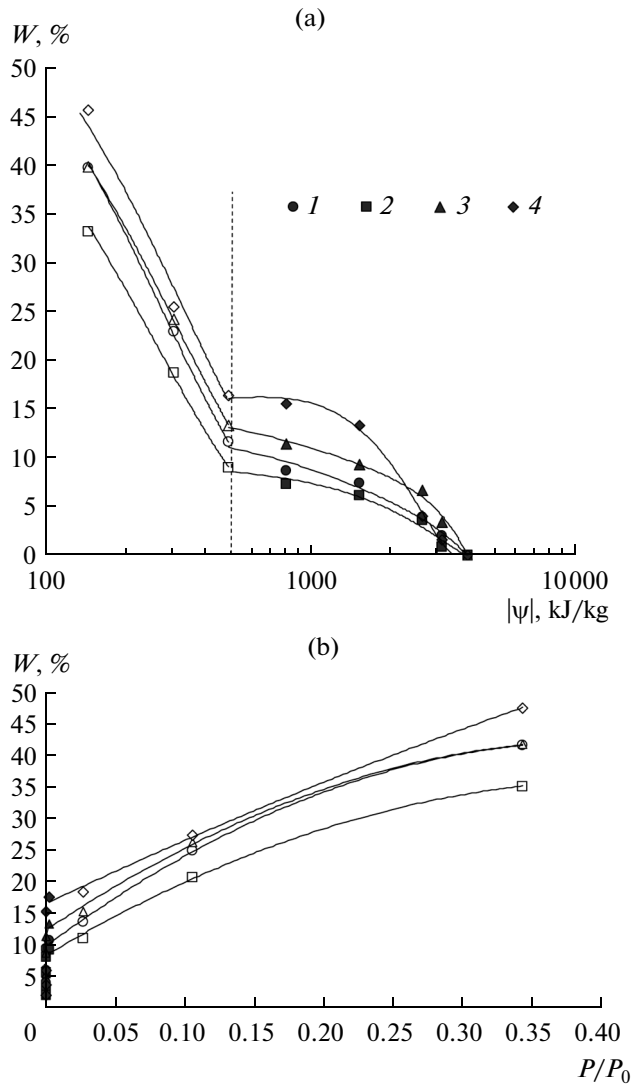


Fig. 2. (a) Polanyi potential curves and (b) SIs calculated from them for soil colloids. The numbers of curves *1–4* correspond to the numbers of soil colloid samples; filled symbols refer to the conditionally isolated layer of strongly bound moisture, which cannot be removed at temperatures of nearly 100°C and above.

simultaneous control over P/P_0 and T, also enabled us to determine (seemingly, for the first time) the functional relation between these values obtained in the standard mode of drying the samples of disperse materials and to show the complete coincidence of this relation with theoretical formula (7).

Using above-determined parameter Q = 2255 kJ/kg and conventionally chosen (for the regime of the experiment [7]) parameters of the external laboratory apartment $T_r = 20$°C (293 K) and $f = 0.5$ (50% relative air humidity), we may estimate the values of moisture thermodynamic potential for different stages of drying soil colloids by basic formula (8). The resulting absolute values of Ψ are listed in Table 1. As can be seen from the presented data, the values of Ψ varied from 145 to 3929 kJ/kg within the temperature range of the experiments on colloid dehydration of 27–500°C. Since, at the last step of the experiment, the drying temperature was higher than the critical point of water, adsorbed moisture was seemingly unable to form a continuous phase (solvation layer). This is indirectly evident from the values of the pressure equivalent to the thermodynamic potential (26000–40000 atm), which exceed all estimates known for molecular pressure of liquid water (10000–24000 atm [13, 14]).

The sorption isotherms calculated from the data of Table 1 by formula (5) according to the Polanyi potential theory are presented in Fig. 2. To make the analysis more convenient, Fig. 2a shows the initial Polanyi curves (the $W(\Psi)$ dependences), while Fig. 2b depicts the sorption isotherms. Both dependences clearly show the region, in which the absolute values of the potential are higher than 500 kJ/kg and the values of P/P_0 are lower than 0.03 units, with this region corresponding to drying temperatures higher than 70°C (dotted line in Fig. 2a), at which the physical mechanism of water retention is obviously changed. In this region, the values of humidity for the examined colloids varied from 9 to 16.4% and amounted to at least a third of the initial amount of water at room temperature, i.e., a rather large fraction of it.

The aforementioned results indicate that, when determining the effective specific surface area by the BET method, the pressure range should be confined to $0.03 \le P/P_0 \le 0.34$, i.e., to the data on drying the colloids in a range from room temperature to 70°C. This temperature range ensures the presence of solvation layers, including monolayer W_m, which is required for estimating S by the BET method. This is of importance from the methodological point of view, because, when determining specific surface area by the proposed method, the differential drying of samples should obviously be carried out in the mentioned temperature range (below 70°C). Indeed, within this range, the SIs represented in the BET coordinates are almost ideal straight lines with correlation coefficients $R^2 = 0.99–1$, as they must be in accordance with the BET theory (Fig. 3). The corresponding equations of linear regression in the $x = P/P_0$, $y = F_{BET} = (P/P_0)/W(1 - P/P_0)$ coordinates have the following forms: sample 1, $y = 3.38x + 0.15$, $R^2 = 1$; sample 2, $y = 3.98x + 0.20$, $R^2 = 1$; sample 3, $y = 3.18x + 0.12$, $R^2 = 1$; and sample 4, $y = 3.01x + 0.12$, $R^2 = 0.995$. The desired S values were calculated from the regression parameters of the equations by formula (3) (Table 1, the bottom line). As can be seen from the aforementioned data, the estimates obtained for different colloids had close values of about 1000 m^2/g (865–1160 m^2/g).

The following result is also of interest. Drying at 105°C does not completely remove moisture from soil colloids and finely disperse powders; i.e., it does not

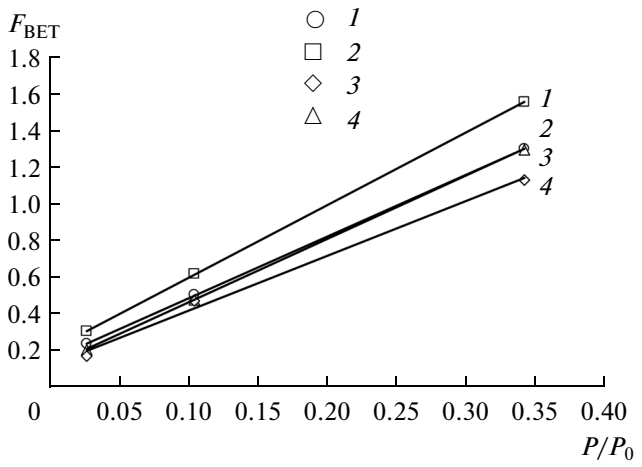


Fig. 3. Fragments of SIs plotted for soil colloids in the BET coordinates. The denotations are the same as in Fig. 2.

result in an "absolutely dry" state. Therefore, the standard drying of colloidal materials with a surface area of about 1000 m^2/g at water boiling temperature (commonly accepted in soil science, pedology, and materials science) with the aim to achieve the "absolutely dry" state may lead to large errors. Let us recalculate the data on the "absolute zero" of humidity obtained at 500°C (Table 1) for the standard "zero" approved in soil science (pedology) and obtained at 100°C. For this purpose, we use the following simple algebraic formula, which follows from the determination of the humidity as the ratio of the difference between the masses of a humid and an "absolutely dry" material to the latter mass:

$$W(T) = 100 \times \frac{W_0(T) + 100}{W_{100} + 100} - 100, \qquad (9)$$

where $W(T)$ is the desired new "absolute zero" humidity reached at 100°C and $W_0(T)$ is the corresponding initial "absolute zero" humidity attained at 500°C. At $W_0(T) = W_{100}$, the formula will obviously yield a zero value of $W(T)$.

The new values of humidity obtained for samples 1–4 by formula (9) are listed in Table 2. They were used to estimate once again the corresponding values of effective specific surface area using equation (2) and the BET model. The comparison of these values with the initial estimate (Table 1) revealed differences that were rather large even for colloids and equal to 100–260 m^2/g or 10–25% of the initial value, which we assume to be the true one. That is, the drying of colloids, in which the layer of strongly bound moisture reaches humidity values W_0 of 10–15%, at the standard temperature of about 100°C, which is too low for removal of such humidity, leads to an essentially overestimated mass of an absolutely dry soil. As a consequence, the humidity, effective specific surface area, and all calculated characteristics relevant to the normalization with respect to the mass of the solid phase appear to be artificially understated. Among real natural objects, such a situation is likely to arise in active slits, whose specific surface area is about 1000 m^2/g. This also concerns numerous modern synthetic nanomaterials, of which the quantitative characteristics relevant to the retention of moisture and other chemical compounds, exchange properties, etc., may be severely inaccurate, when the mass of the solid phase is determined by the "standard" dehydration at water boiling temperature.

Table 2. Recalculation of the data on humidity and specific surface area for the examined samples of colloids for the "standard" zero humidity reached at 100°C

T, °C	W, %				$\|\Psi\|$, kJ/kg
	1	2	3	4	
27	28.6	24.2	25.6	26.1	145
47	13.2	10.7	11.6	8.0	305
70	2.7	1.6	1.8	0.7	489
110	0.0	0.0	0.0	0.0	809
S, m^2/g	822.8	712.7	742.3	1052.7	

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-04-00284).

REFERENCES

1. Gregg, S. and Sing, K., *Adsorption, Surface Area and Porosity*, New York: Academic, 1982.
2. Smagin, A.V. and Smirnov, G.V., *Eurasian Soil Sci.*, 1991, vol. 24, p. 119.
3. Smagin, A.V., *Gazovaya faza pochv* (Soil Gas Phase), Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2005.
4. *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and Methods of Soil Physics), Shein, E.V. and Karpachevskii, L.O., Eds., Moscow: Grif i K, 2007.
5. Vadyunina, A.F. and Korchagina, Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochv* (Methods for Studying Physical Properties of Soils), Moscow: Agropromizdat, 1986.
6. Smagin, A.V., *Ekol. Vestn. Sev. Kavkaza*, 2015, no. 3, p. 4.
7. Hoseh, M., *Soil Sci.*, 1937, vol. 43, p. 257.
8. Smagin, A.V., Sadovnikova, N.B., Glagolev, M.V., and Kirichenko, A.V., *Ekol. Vestn. Sev. Kavkaza*, 2006, no. 1, p. 5.
9. Frolov, Yu.G., *Kurs kolloidnoi khimii* (Course of Colloid Chemistry), Moscow: Khimiya, 1989.
10. Voronin, A.D., *Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv* (Structural—Functional Soil Hydrophysics), Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1984.
11. Kholokhonova, L.I. and Moldagulova, N.E., *Uchenie o fazovykh ravnovesiyakh: uchebnoe posobie* (Phase Equilibrium Science: A Manual), Kemerovo: KTIPP, 2009.
12. Volkov, A.I. and Zharskii, I.M., *Bol'shoi khimicheskii spravochnik* (Comprehensive Chemical Handbook), Moscow: Sovremennaya Shkola, 2005.
13. Matveev, A.N., *Molekulyarnaya fizika* (Molecular Physics), Moscow: Vysshaya Shkola, 1981.
14. Shchukin, E.D., Pertsov, A.V., and Amelina, E.A., *Kolloidnaya khimiya* (Colloid Chemistry), Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1982.

Translated by K. Aleksanyan

ISSN 1064-2293, Eurasian Soil Science, 2018, Vol. 51, No. 7, pp. 782–796. © Pleiades Publishing, Ltd., 2018.
Original Russian Text © A.V. Smagin, 2018, published in Pochvovedenie, 2018, No. 7, pp. 836–851.

SOIL PHYSICS

About Thermodynamic Theory of Water Retention Capacity and Dispersity of Soils

A. V. Smagin[a, b, *]

[a] *Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*
[b] *Institute of Forestry, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya 21, Uspenskoe, Moscow oblast, 143030 Russia*
**e-mail: smagin@list.ru*

Received August 24, 2017

Abstract—On the basis of thermodynamic concept on competitive interphase interactions, the idea is forwarded about the ionic-electrostatic mechanism of water retention capacity and aggregative stability of fine solid particles in soil physical systems. The author applies modern data on the nanostructure of colloidal disperse complex of soil physical systems in the gel form, i.e., in the form of noncapillary two-phase system of resistant to aggregation particles separated by solvate layers. Disputable questions are discussed about the role of surface energy and hydration of cations in water retention as well as about the relationship between the matrix (disjoining) and the osmotic water pressures. The fundamental ionic-electrostatic model of water retention capacity is analyzed for the colloidal-disperse bodies in the areas of sorptive and film water on the water retention curve (WRC) in the form of interaction between thermodynamic potential (disjoining pressure), water content, and dispersity (effective specific surface area) of the solid phase. On the basis of this model, the potential dependence is shown between the dispersity and the mobile thermodynamic factors (i.e., temperature, charge, and concentration of ions in the electrical double layer), and the method of estimating the effective specific surface area from the WRC is proposed as an alternative to the commonly adopted BET method. For standard conditions, under which the dispersed system with monomolecular liquid layer maintains its aggregative stability, the specific surface area is calculated according to the WRC slope (the angle coefficient in semi-logarithmic coordinates) and the value of the effective size of water molecules. Simultaneously with the dispersity assessment from the WRC, the energy indices of interphase interactions—the generalized Hamaker constant and the surface tension at the solid–liquid interphase—are determined.

Keywords: soil physical system, thermodynamics, dispersity, water retention curve (WRC), gels, specific surface, electrical double layer (EDL), interphase interactions

DOI: 10.1134/S1064229318070098

INTRODUCTION

Thermodynamically, soils are open multicomponent cohesive dispersed physical systems of variable composition and ratio between solid, liquid, and gaseous phases. Interphase interactions in these systems control their physical state and dynamics, as well as their essential functions in natural and anthropogenic landscapes. For a quantitative estimation of the structural-functional arrangement of soil physical systems, the classical thermodynamics uses the basic dependence between the water potential (the Gibbs specific energy) and the water content, which is referred to as the soil moisture characteristic curve (SMC) in Russian publications [2, 5] or as the soil water retention curve (WRC) in foreign works [29, 44]. Proceeding from WRC, not only the fixed properties and structure of soil physical system are assessed but also its changes upon mass exchange with the environment [29, 34, 45].

Traditionally, WRC is meant to be an empirical relationship between the potential (equivalent pressure) and the content of liquid water [2, 5, 23, 44]. Empirical mathematical models of water retention became widespread in soil hydrophysics in the 1970s–1990s, and their summarization in [5] lists several dozens of equations. At present, the van Genuchten function appears to be a commonly recognized empirical model, which is most often applied in computer modeling of water and solute transport, as it describes adequately a wide range of mobile water with absolute pressures varying from 0 to 1000 kPa [34, 44]. Empirical models of water retention also include the so-called pedotransfer functions, which use the relationships between the WRC parameters and the density (porosity), dispersity, organic matter content, exchangeable cations, and other controlling factors as well as statistical methods for their estimation, including multifactor analysis, multiple regression, geostatistical methods, neural networks, etc. [32, 33]. More rarely, empirical studies are supplemented by fundamental research with the use of similarity (scaling) and self-

similarity (fractal geometry) theories, regularities of pore-size distribution, and other physical and physico-statistical regularities [5, 6, 11, 12, 15, 20–23, 31, 42, 43]. In Russia, these investigations are being developed in St. Petersburg Agrophysical Institute and in Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University; among the most interesting recent achievements, the physico-statistical water retention model should be noted. It is based on the lognormal distribution of effective pore radii, which results in a well-known van Genuchten function as a particular case and permits taking into account the hysteresis WRC phenomena [20–23, 42, 43]. All these developments are mainly based on the capillary-porous physical model of mobile water retention with a focus on the liquid–solid interaction in soil upon the variable water content and constant particle-size distribution.

There are just a few works, in which the assessment of water retention is performed with due account for the no less important interaction between particles through the disperse medium layers with the possibility to form gel structures of the colloidal-dispersion complex [4, 13, 18, 27, 37]. At the same time, for free disperse systems, the issues of interparticle interaction and aggregative stability have been studied long ago within the classic DLVO (Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek) theory with physically grounded models of disjoining pressure effect [28]. In principle, it is possible to use the fundamentals of this theory (and, in particular, the equation of the ionic-electrostatic component of disjoining pressure) to the film and sorbed water within the water capacity range comparable with the interval for capillary and gravitational water, especially in fine-grained soils and artificial water-retaining materials [18, 36, 37, 41]. Dispersity (the effective specific surface area) along with thermodynamic potential and the mass fraction of water are the characteristics of the state of physical system in this model. Theoretically, the former may change upon the interaction of fine-dispersed particles and it depends on the factors that control the thickness of the ionic-electrostatic barrier (the effective thickness of the electrical double layer (EDL)); in particular, these are the charge of ions, the electrolyte concentration in the pore solution, and the temperature. In this case, the effective specific surface area may be calculated directly from the WRC as an alternative to the standard BET method.

From the theoretical viewpoint, the suggested approach develops the thermodynamic concept of competitive phase interactions upon the description of the physical state of soils proposed in [37]; it permits predicting the potential dynamics of WRC as the basic index of physical properties of soils and soil-like products [2, 30, 37] upon seemingly insufficient transformation of the composition and concentration of liquid components. In practice, this means the possibility to manage the physical state of soils via their colloidal-disperse complex using small impacts and tiny doses of soil conditioners.

This research is aimed at the fundamental and experimental substantiation of the ionic-electrostatic mechanism of water retention and the changes in dispersity of soil physical systems, as well as at the development of a new procedure for assessing the effective specific surface area and energy indices of interphase interactions from WRC.

OBJECTS AND METHODS

The objects of this study are represented by water retention curves obtained for more than 50 different soil samples and a number of natural and synthetic colloidal-disperse materials represented by clay minerals, caustobioliths, drilling sludge, and strongly swelling polymeric hydrogels applied in farming practices for increasing the water retention capacity of soils and for optimizing the rhizosphere [38]. The main sampling consisted of the following 30 items: (*1–4*) sandy soddy soil under pine forest (A, B, BC, and C horizons); (*5–7*) loamy sandy soddy steppe soil (A, B, and C horizons); (*8–9*) loamy sandy soddy-podzolic soil, the Ap horizon; (*10–11*) silt loamy dark chestnut y soil, the Ap horizon; (*12–13*) heavy loamy ordinary chernozem, the Ap horizon; (*14–15*) light clayey alluvial soil (Vietnam), the A horizon; (*16*) light loamy gray forest soil, the Ap horizon; (*17*) silt loamy soddy-podzolic soil, the A horizon; (*18*) solonetz, the AE horizon; (*19*) silt loamy chestnut soil, the Ap horizon; (*20*) silt loamy ordinary chernozem, the Ap horizon; (*21*) heavy loamy brown forest soil, the A horizon; (*22*) clayey Vertisol (Tunisia), the A horizon; (*23*) lowmoor peat soil, the T horizon; (*24–26*) brown coal (lignite) at different temperatures; (*27*) acrylic hydrogel PM-1 with peat filling (Ural chemical plant) [38]; (*28*) acrylic hydrogel BYM-0 with biosludge (Ural chemical plant) [38]; (*29*) acrylic hydrogel Aquasorb (France); and (*30*) montmorillonite.

In the sorption area, WRCs were obtained by the traditional adsorption-static method [19] with the long-term (4–5 weeks and more) exposure of samples in the air with the fixed value of relative pressure of water vapor (P/P_0). It was also assessed by express dynamic methods in the fluxes of moistened and dry carrier gas with determination of output curves of water vapor adsorption and desorption using an LKhM-80m gas chromatograph (katharometer detector) or a programmed sensor of the relative air humidity DS1932 (“hygrochron” in agreement with the earlier suggested approach [17, 36, 37].

The WRCs were calculated from the isotherms of water vapor desorption and adsorption as the functions of the water mass fraction in the sample (W) and P/P_0 in the form of the functional relationship between the thermodynamic water potential (ψ) and

the water content with due account for the well-known thermodynamic equation [2]:

$$\Psi = \frac{RT}{M}\ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (1)$$

where R, J/(mol K) is the universal gas constant; T, K is the absolute temperature; and M, kg/mol is the molar water mass.

The adsorption equilibrium methods are usually restricted to the range of absolute values of water potential (2.7–256.7 kJ/kg, for P/P_0 from 0.15 to 0.98) [19]. Beyond this range, additional data for a number of samples were obtained from the Ψ–W relationship using the methods of equilibrium centrifuging [37], cryoscopy [17], and the thermal water desorption [40]. In addition to our experiments, the input data included published data on water vapor adsorption–desorption by soils and colloidal-dispersed materials at different temperatures [8, 10], as well as the WRC data for zonal soils, various fractions of soil particles and clay minerals in the range of absolute values of soil water pressure of 0.1–2300 atm and the effective specific surface area 2.6–300 m^2/g taken from [11].

Experimental WRC data were approximated using the built-in algorithm of nonlinear regression "Regression Wizard" in Sigma Plot 9 version software [1]. This program evaluated automatically not only the values of nonlinear regression parameters but also their variation in the form of corresponding standard deviations, the statistical significance (difference from zero), as well as the principal statistical indices, i.e., reliability (R^2), and standard error (s) of approximation.

Methodological problems. A routine capillary model uses WRC in the form of relationship between the capillary-adsorption (matrix) potential and the soil water content mainly obtained by the mechanical separation of water from the solid phase matrix. For the considered diapason, we estimate the total thermodynamic potential (eq. 1) or, actually, an algebraic sum of disjoining and osmotic pressure of soil water by the method of adsorption equilibrium [2, 5]. Upon substantiating the calculation-experimental method of WRC evaluation as a combination of data obtained from the adsorption-static and tensiometric (capillarimetric) analyses, Voronin [2] supposed that the osmotic pressure of water in the adsorption area is negligibly small as compared to the matrix pressure; therefore, the total potential in this area is actually similar to the capillary-sorption (matrix) potential, with WRC reflecting the dependence between the full potential and the water content. This hypothesis was experimentally proved [3] only for the samples of nonsaline soils with the low osmotic pressure. In our study, the data were obtained on water retention for fine-grained soils (loam and clay) of the Astrakhan Lowland characterized by the electrical conductivity of the saturated pore solution (EC) ranging from 0.7 dS/m (no salinization) to 30 dS/m (high salinization). These data were obtained by the methods of equilibrium centrifuging (matrix potential) and cryoscopy (full potential) with the subsequent approximation by the power models of Campbell [29] and van Genuchten [44] (Fig. 1) These data supported the hypothesis [2, 3] about the actual equality of full and matrix potentials in the area of adsorbed water below the maximum hygroscopicity (MH) not only for nonsaline soils but also for solonchaks; they also testified to the possible combination of desorption (full potential) and mechanical (matrix potential) methods of water removal for obtaining WRC.

At the same time, it should be noted that these results have constraints and cannot pretend to be universal. First, it is desirable to use the same sample, which, after the mechanical removal of water (by tensiometry, press, and or centrifuge) is further analyzed by sorption methods (vapor desorption in static atmosphere or in the gas carrier flux), as well as by the new thermodesorption method at different temperature stages of drying [40]. This requirement is related to the WRC hysteresis phenomena. Second, drying cannot be used upon sample preparation for the analysis in the sorption range, especially in the case of saline soil. The main water should be removed mechanically. If it contains salts, they are removed with the soil solution. Otherwise (drying of wet saline soils in the air), precipitating salts produce the additional hygroscopic solid phase, which results in the significant overstating of absolute values of the total water potential in the sorption part of the WRC, so that it does not fit the matrix potential values on the WRCs (Fig. 2).

The second problem is related to the assessment of specific surface area by the isotherms of water vapor sorption using the BET method [7, 19]. Because of the hysteresis of sorption isotherms only desorption curves should be used for obtaining unambiguous results; wet (rather than air dry) samples should be analyzed after the mechanical removal of water from them (see above) or after the airborne wetting of dry samples in a desiccator as suggested in [19]. The S_{BET} assessment is also complicated by the influence of temperature on the adsorption isotherms: the cooler the soil, the larger the adsorption monolayer capacity and, hence, the specific surface. This gives rise to the requirement for the comparative assessment at a constant room temperature (about 20°). In addition to the specified technical difficulties, the routine in soil science and soil engineering BET method gives birth to many uncertainties upon the calculation procedure proper. The guidebook [19] defines the area of BET model validity as $0.05 \le P/P_0 \le 0.35$. If we use the precise dynamic methods [17, 36] resulting in the continuous curve of adsorption isotherms or approximation of the point isotherms by the known polynomial models according to [19, 36], it turns out that several straight lines may be drawn in the given interval with the same probability; each of them will fit its own value

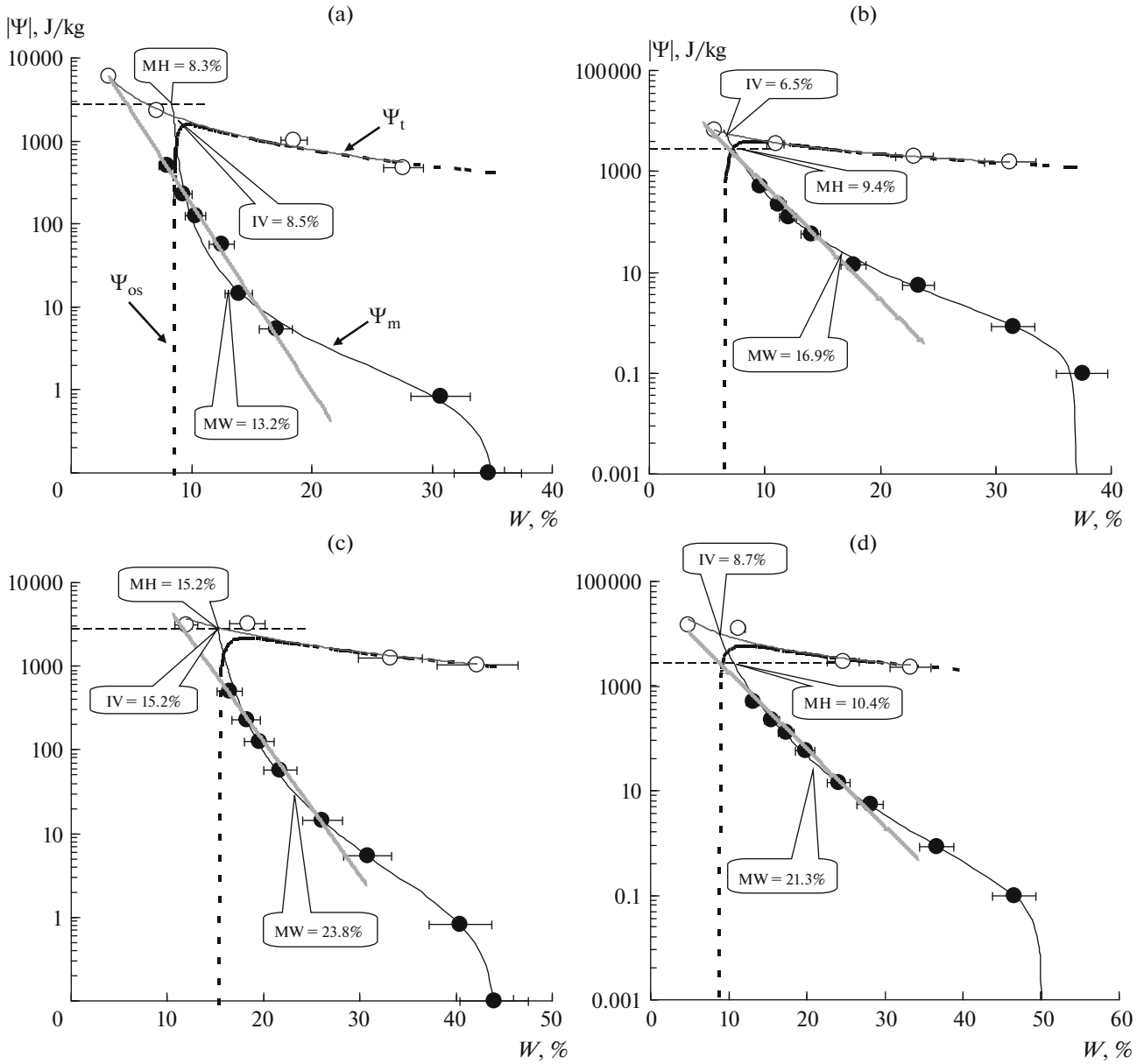


Fig. 1. Relationship between the total (Ψ_t), matrix (Ψ_m), and osmotic (Ψ_{os}) potentials and the water of fine-textured soils from the Astrakhan Lowland: (a) brown semidesert soil, surface sample, EC = 3.7 dS/m; (b) brown semidesert soil, the BC horizon (100 cm), EC = 18.7 dS/m; (c) meadow-chernozemic solonchak, the B_{ca} horizon (30 cm), EC = 11.7 dS/m; and (d) meadow-chernozemic solonchak, the BC horizon (100 cm), EC = 30.0 dS/m. Designations: IV—insolubilizing water volume, MH—maximum hygroscopicity, MW—field water capacity; the gray straight line is model (4). Equations of approximating curves:

Van Genuchten model:

a $\Psi_m = \{(\{(0.49 - 0.11)/(W\rho_b - 0.11)\}^{2.81} - 1)/0.104\}^{0.65}$; $R^2 = 0.98$

b $\Psi_m = \{(\{(0.52 - 0.042)/(W\rho_b - 0.0042)\}^{5.055} - 1)/0.157\}^{0.80}$; $R^2 = 0.98$

c $\Psi_m = \{(\{(0.63 - 0.19)/(W\rho_b - 0.19)\}^{3.995} - 1)/0.09\}^{0.75}$; $R^2 = 0.98$

d $\Psi_m = \{(\{(0.74 - 0.00019)/(W\rho_b - 0.00019)\}^{7.42} - 1)/0.775\}^{0.86}$; $R^2 = 0.98$

Campbell model:

a $\Psi_t = 20953W^{-1.097}$; $R^2 = 0.98$

b $\Psi_t = 37767W^{-0.944}$; $R^2 = 0.98$

c $\Psi_t = 43497W^{-0.9934}$; $R^2 = 0.90$

d $\Psi_t = 100986W^{-1.057}$; $R^2 = 0.88$

Model (4):

a $\Psi_m = 29077\exp(-0.5167W)$; $R^2 = 0.99$

b $\Psi_m = 97011\exp(-0.5238W)$; $R^2 = 0.98$

c $\Psi_m = 196666\exp(-0.369W)$; $R^2 = 0.99$

d $\Psi_m = 53905\exp(-0.340W)$; $R^2 = 0.99$

of monolayer water and, respectively, S_{BET} (Fig. 2b). This estimate may vary by 20–40% and more (Table 1, columns 2 and 3).

Calculation by the BET method takes into account the monolayer water (W_m) and the effective area of water molecule (s_0):

$$S_{BET} = W_m \frac{N_A s_0}{M} = k \cdot W_m, \quad (2)$$

where N_A, 1/mol is the Avogadro number, M, g/mol is the molar mass of water; and k, m^2/g is an auxiliary constant. Gregg S. and Sing K. [7] give an equation for the "geometric" estimation of s_0 proceeding from the hexagonal (the closest) packing of ideal spherical water molecules, its density in the liquid state (ρ, kg/m^3) and the molar mass M, kg/mol:

$$s_0 = 1.091 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{M}{\rho \cdot N_A}\right)^2}, \quad (3)$$

where 1.091 is the packing factor for 12 closest molecules in the liquid and 6 molecules on the flat adsorbing surface. For water, calculation according to Eq. (3) results in $s_0 = 1.05 \times 10^{-19}$ m^2 and the constant $k = 3515$ m^2/g, which is somewhat lower than the value traditionally used in soil science $k = 3616$ m^2/g [19]. However, paper [7] reasonably criticizes the calculation method according to the adsorbate density and cites examples of a significant (up to two-fold) variation in the s_0 value depending on the determination method and adsorbent structure. The elementary geometric calculation based on the maximal crystallochemical radius of the polar water molecule $r = 1.38 \times 10^{-10}$ m gives us the area of molecule projection on a flat surface (the circle area) equal to $s_0 = 5.98 \times 10^{-20}$ m^2. If we consider the areas uncovered by this projection in the shape of a square, which the molecule of radius r is inscribed into (cubic packing) or a rhomb (hexagonal packing), we come up with $s_0 = (2r)^2 = 7.62 \times 10^{-20}$ m^2 and $s_0 = (2r)^2 \sin(\pi/3) = 6.60 \times 10^{-20}$ m^2, respectively. In this case, the k value in Eq. (2) will be equal to 2549 and 2207 m^2/g in case of the cubic or hexagonal packing of molecule plane projection, respectively, which is considerably lower (by 1.4–1.6 times) than the value used in soil science ($k = 3616$ m^2/g).

These methodological difficulties point to the imperfectness of the BET method assumed as a standard; they should be taken into attention upon the development of alternative methods of assessing specific surface of polydisperse systems and comparing their results.

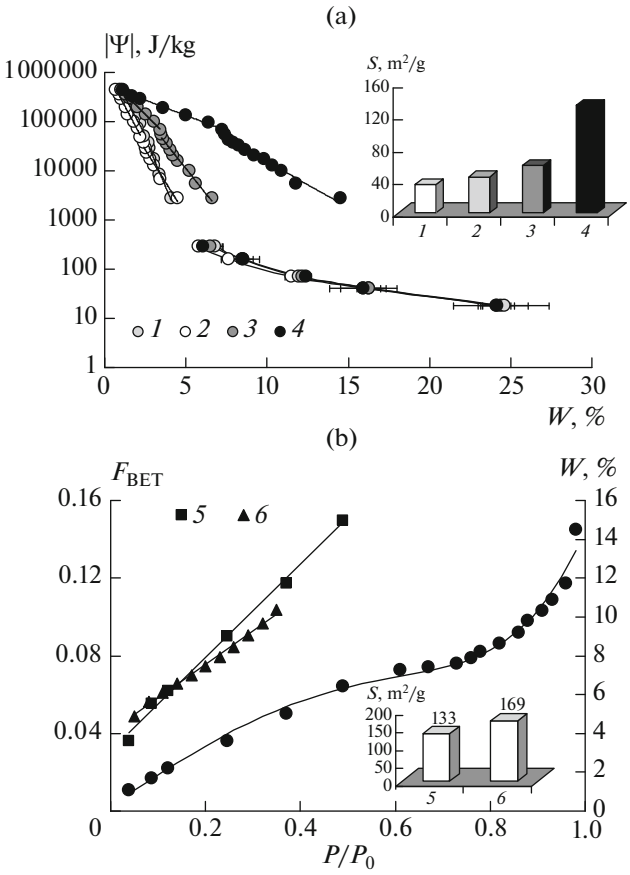


Fig. 2. The influence of artificial salinization on the WRC and specific surface of soddy-podzolic light loamy soil: (a) WRC by gas-chromatography method for desorption isotherms (top) and centrifuging method (bottom); inset figure: the specific surface according to the BET method; NaCl concentration in the soil solution: (*1*) 0 (distilled water), (*2*) 0.05 M; (*3*) 0.25 M; and (*4*) 1 M; (b) desorption isotherm for the variant with 1 M NaCl and its approximation by the Kharitonova–Vityazev polynomial [19]: $W\% = 0.272 + 16.09P/P_0 - 17.46P/P_0^3 + 15.61P/P_0^6$; $R^2 = 0.99$ (right axis *y*); BET straight lines for experimental points in the isotherm (*5*): $F_{BET} = 0.24P/P_0 + 0.03$; $R^2 = 0.99$; and for polynomial points (*6*) $F_{BET} = 0.17P/P_0 + 0.04$; $R^2 = 0.99$ (left axis *y*); inset figure: the comparison of two estimates of specific surface based on the obtained BET straight lines.

RESULTS AND DISCUSSION

Ionic electrostatic mechanism of water retention and changes in dispersion of soil physical systems. Let us analyze in detail data on the proportion between different components of the thermodynamic water potential and water content in soils as regards the disputable question about the role of cation hydration in the water retention capacity of soils (Fig. 1). The crossing point of curves fitting the full and matrix (capillary-adsorption) potentials corresponds to the water of so-called insolubilizing volume (**IV**) [14]. It is either close to or (in case of high salinization) lower than the maximum hygroscopic water content of soil, which, in turn, is controlled by the intersection of water retention curves with the line of the absolute value of water potential equal to 2734 J/kg ($P/P_0 = 0.98$ at $T = 293$ K). The curve of osmotic potential (pressure)

Table 1. Comparative estimation of specific surface indices and generalized Hamaker constants for the interphase interactions in the coherent disperse systems (see the text for explanations; enumeration of samples fits the list in the "Objects and Methods" section.

No.	S^1_{BET}	S^2_{BET}	ln a, J/kg	b, kg/kg	R^2	s	S_{st}, m^2/g	A_G, J × 10^{-19}
	m^2/g							
1	7.0	5.0	13.56 ± 0.04	671.30 ± 17.30	0.997	0.04	5.4	3.1
2	4.2	2.8	13.55 ± 0.03	1193.80 ± 12.84	0.999	0.04	2.2	3.0
3	3.5	2.7	13.50 ± 0.06	1473.80 ± 28.04	0.997	0.04	2.9	2.9
4	2.7	2.2	13.58 ± 0.11	1816.90 ± 61.78	0.992	0.15	2.7	3.1
5	14.6	12.1	13.71 ± 0.04	323.23 ± 15.52	0.998	0.04	11.2	3.6
6	19.1	14.3	13.73 ± 0.10	268.64 ± 10.33	0.994	0.05	13.5	3.6
7	5.1	3.4	13.48 ± 0.19	1026.2 ± 75.77	0.980	0.13	3.6	2.8
8	15.8	11.9	14.34 ± 0.08	294.7 ± 6.3	0.998	0.07	12.3	6.7
9	18.3	13.2	13.97 ± 0.17	295.3 ± 13.6	0.989	0.15	12.3	4.6
10	41.3	32.1	13.82 ± 0.09	48.9 ± 1.2	0.998	0.08	33.3	4.0
11	48.2	33.9	13.93 ± 0.12	108.8 ± 3.6	0.995	0.11	32.8	4.4
12	67.2	57.3	14.29 ± 0.14	110.4 ± 4.0	0.994	0.12	61.5	6.4
13	77.2	59.6	13.60 ± 0.12	58.3 ± 2.1	0.993	0.12	62.1	3.2
14	88.5	69.1	13.87 ± 0.03	58.9 ± 0.4	1.000	0.02	74.1	4.2
15	106.2	77.1	13.82 ± 0.09	48.9 ± 1.2	0.998	0.08	76.4	4.0
16	40.1	29.2	13.70 ± 0.03	112.54 ± 3.63	0.995	0.04	32.2	3.5
17	64.1	51.0	13.66 ± 0.03	68.13 ± 2.10	0.996	0.02	53.2	3.4
18	49.7	36.1	13.68 ± 0.04	89.31 ± 3.56	0.992	0.05	40.6	3.5
19	95.7	72.1	13.61 ± 0.03	46.56 ± 1.57	0.994	0.04	77.8	3.2
20	117.9	93.6	13.61 ± 0.03	36.57 ± 1.18	0.995	0.04	99.1	3.2
21	153.0	111.2	13.19 ± 0.05	30.36 ± 0.59	0.997	0.08	119.3	2.1
22	200.4	172.3	13.52 ± 0.02	21.61 ± 0.73	0.997	0.02	167.7	2.9
23	250.0	169.4	14.40 ± 0.06	22.10 ± 0.34	0.999	0.06	163.9	7.1
24	350.6	272.1	13.24 ± 0.03	13.45 ± 0.26	0.997	0.05	269.4	2.2
25	250.0	171.2	13.06 ± 0.11	20.25 ± 1.34	0.991	0.06	178.9	1.9
26	222.7	149.3	13.01 ± 0.10	24.64 ± 1.35	0.994	0.07	147.1	1.8
27	472.4	360.2	13.85 ± 0.10	10.30 ± 0.81	0.989	0.12	351.8	4.1
28	302.1	208.6	14.05 ± 0.66	17.09 ± 0.70	0.992	0.06	212.0	5.0
29	373.2	278.6	13.73 ± 0.05	12.07 ± 0.47	0.993	0.06	300.2	3.6
30	610.0	448.9	9.67 ± 0.29	8.53 ± 0.43	0.985	0.19	424.8	–

S^1_{BET} is the assessment according to the smoothened data after approximation of isotherms by the polynomial model [37] with BET constant $k = 3616$; S^2_{BET} is the assessment according to the input experimental data on isotherms with $k = 3515$.

drawn as a dash line in Fig. 1 was obtained from the difference between the curves of full and matrix potentials approximated by the models of Campbell [29] and van Genuchten [44]. It has a shape of nonlinear function with an extreme: with the increasing water content, the osmotic pressure first increases (which reflects the effect of soil solution concentration) and then sharply falls down to zero in the point of IV water content.

The mechanism of concentration/dilution observed in the area of mobile (available) water up to the conventional wilting point ($\Psi = 1500$ J/kg), in which the osmotic pressure curve no longer coincides with the dependence between the total water potential and water content, is indirectly supported by the closeness of power potential in the Campbell model to (–1). This means that the osmotic pressure (P_{os}) is inversely proportional to the soil water content, i.e., it obeys the dilution law deduced for soils in [29]: $P_{os} = P_s W_s / W$, where P_s and W_s are the osmotic pressure and water content upon the full saturation of soil (total water capacity).

The subsequent fall in P_{os} upon the decreasing water content is explained by the effect of insolubilizing volume, i.e., by the cohesion of water molecules by surface forces at the solid phase, including, probably, the precipitated salts having reached the critical solubility product value upon concentration. This effect has been well studied in classic hydrophysics [14]; and in addition to the above-described extreme mode of $P_{os}(W)$ relationship, it is proved by direct measurements of electrical conductivity of soil water separated by equilibrium centrifuging upon WRC analysis [16]. Below the certain soil water content (taken conventionally as the maximum molecular water capacity), the electrical conductivity and, hence, the concentration of separated soil solution and its osmotic pressure start decreasing rather sharply down to experimentally undetectable values in the UV point.

A reasonable question arises in this context: how is the soil water cohesion by cations (ions) in this area provided, if the water is unable to dissolve salts (hydrate ions)? The next physical explanation may probably reconcile supporters of the Vageler's concept of water retention by cation hydration and their opponents, starting from Rode [14], who believe in the leading role of colloidal disperse complex in the hydration of solid-phase surface. The well-known phenomena of IV, zero electrical conductivity, and zero osmotic pressure observed for the part of bound water in soils and fine-grained materials [14, 16, 37] attest to a higher energy of interaction between EDL ions and the surface than the hydration energy of these ions. Therefore, *the surface of colloidal particles makes the main contribution to water retention, whereas the diffuse EDL serves as a sort of its continuation (bifurcation) in the dispersed medium*. In this case, the fractal character of the interphase boundary is probable, with the hydrophilic properties of surface increasing proportionally to EDL widening. For soil gels, the idea of fractal structural arrangement is forwarded and supported on a qualitative level by electron microscopy in [24, 25].

EDL cations may be also considered as the surface charges, only at some distance from the surface. They spend the bulk of their free energy for the strong electrical interaction with the surface, the more, the closer to the surface, and only the rest of it, for the interaction with polar molecules of water (hydration). Therefore, upon removal (membrane pressing at a pressure of thousands kPa, centrifuging), the soil water contains almost no dissolved electrolytes, and the soil does not acquire an electric charge in this kind of experiments, as it were if EDL ions had been bound to water (had been hydrated) stronger than to the surface. Outside the EDL diffuse layer (this boundary is conventional, because the exponentially decreasing concentration of ions in the diffuse layer rules out the distinct boundary), ions in the free pore solution are totally hydrated. *However, they make no contribution to the water retention capacity of the solid phase of soil* (the matrix potential or the disjoining pressure, which is equivalent to it); adding only to the osmotic component of the full water potential.

Passing to the quantitative description of the above-listed physical pattern of ion-electrostatic mechanism, let us emphasize that the water-retention capacity and dispersion in the bound water diapason are controlled mainly by the colloidal soil complex. The colloidal-dispersed complex **(CDC)** in the stable state of separate particles should apparently represent a two-phase system (gel) with symmetric water films [[13, 14, 37]. For the particles of 1–60 nm in diameter, according to the Kelvin equation [28], at $T = 293$ K, we come up with the interval of equilibrium values P/P_0 ranging from 0.34 to 0.98; this means that soil colloids will be always saturated with water upon the soil water content higher than the maximum hygroscopicity ($P/P_0 > 0.98$), with the certain part of CDC remaining saturated also in the air-dry diapason up to $P/P_0 = 0.34$, i.e., in a rather dry air. The most probable physical model of CDC represents planar surfaces with an electrical double layer separated by a liquid interlayer [13, 14, 37].

The water-retention capacity and the probable variation in CDC dispersion form as a result of competitive surface interactions between solid particles and solid-liquid phase [37]. Fine dispersed particles stabilized by ionic electrostatic barrier show the maximal dispersion and the excessive surface energy spent for water retention. If the barrier is destroyed, the particles get in touch with one another (coagulate), the dispersion and surface energy decrease, as well as the water retention does. As a result, *dispersion and water retention capacity depend on the properties not only of the solid phase but also of the liquid phase*, the composition and concentration of components of the latter controlling the aggregative stability of particles according to the DLVO theory [28]. In the CDC stability diapason, the forces of ionic-electrostatic repulsion appearing upon approaching and partial overlapping EDLs predominate over the molecular forces of particle attraction, which cause the disjoining pressure phenomenon, with water being absorbed by the disperse system according to the exponential law (the Derjaguin equation for the disjoining pressure) [28]).

Taking into account the above-discussed ideas for the soil physical system, the fundamental ionic-electrostatic model of water retention written in the form of absolute value of thermodynamic potential ($|\Psi|$) of water with disjoining pressure, is written as follows [18, 36, 37]:

$$|\Psi| = a\exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right) = a\exp\left(-\frac{W}{S\rho\lambda}\right) = a\exp(-bW), \quad (4)$$

or in the form of isotherm of water vapor sorption, taking (1) into account [36]:

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{M|\Psi|}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{Ma}{RT}\exp(-bW)\right), \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{S\rho\lambda}, \quad (6)$$

where b, kg/kg is the physically grounded parameter controlled by the dispersion and the EDL properties; a, J/kg is the physically grounded parameter standing for the surface shape and potential (charge); h, m is the water film thickness; S, m^2/kg is the effective specific surface of the interphase boundary; ρ, kg/m^3 is the water density; λ, m is the effective EDL thickness. For the planar particles and the symmetric electrolyte, the latter is calculated as follows [28]:

$$\lambda = \frac{1}{Fz}\sqrt{\frac{\xi\xi_0 RT}{2C_0}}, \quad (7)$$

where F, C/mol is the Faraday constant; z is the valence of ions, and C_0, mol/m^3 is their molar concentration in the pore solution, ξ, F/m is the electric constant, and ξ_0 is the relative dielectric conductivity of water; see Eq. (1) for other designations.

The PHS analysis for a wide range of systems of various genesis and fineness testify to the validity of model (4) (Fig. 3). The statistically reliable values of ln a and b parameters with the confidence intervals at the significance level $p \le 0.001$, with high indices $R^2 = 0.980–0.999$ and low standard approximation errors $s = 0.02–0.19$ are listed in Table 1. It has been known for a long time in soil science that many experimental data on the water retention capacity of soils fit the empirical exponential model $|\Psi| = a\exp(-bW)$, or its linear analogue $\ln|\Psi| = \ln a - bW$ in the semi-logarithmic scale. In soil science, this fact was first discovered by Sudnytsin in 1964, who tried to explain it theoretically by hydration of cations [18]. In paper [37], this fact must have been treated fundamentally for the first time on the basis of DLVO theory (the equation of ionic-electrostatic component of the disjoining pressure (4)). At present, the similar ideas are intensely developed by our colleagues at the Department of Soil Physics, Lomonosov Moscow State University [9, 41].

The possibility of physically grounded assessment of dispersion and energy indices of interphase interaction using model (4) appears to be of special interest. The simple equation for estimation of dispersion (effective specific surface) may be deduced from (6):

$$S = \frac{1}{b\rho\lambda}. \quad (8)$$

As is seen, dispersion depends on two indices, i.e., inclination of disjoining pressure isotherms b and the effective thickness of EDL λ. Since λ, according to (7), depends on temperature and concentration and charge of ions, S value for the same disperse system

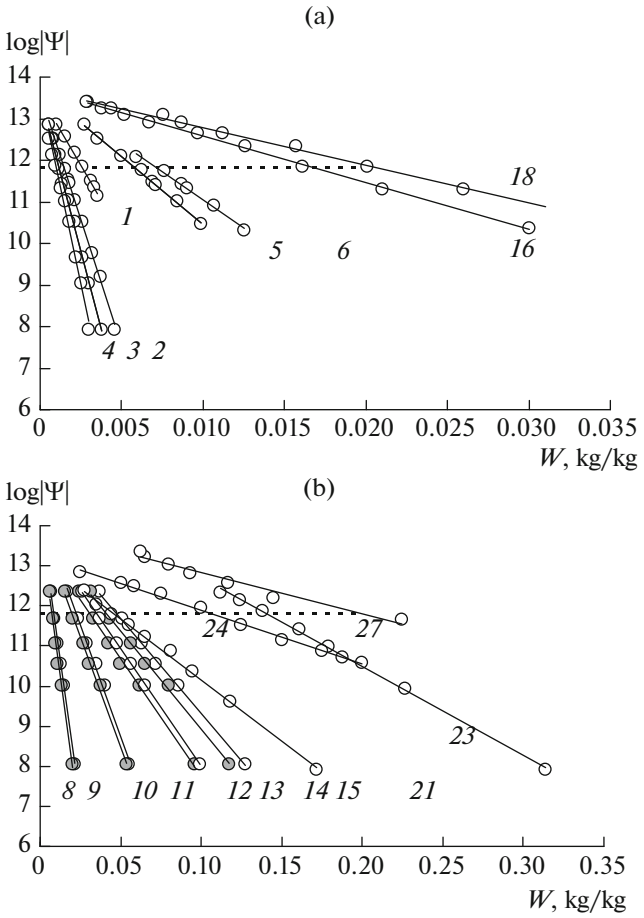


Fig. 3. WRC of disperse systems and their approximation by ionic-electrostatic model (4): (a) soils and subsoil horizons; (b) colloidal substances and sols of different fineness; (*1–24*) sample numbers according to the list (see "Objects and methods" section). Filled and empty symbols designate adsorption and desorption of water vapor, respectively.

may vary substantially, either increasing or decreasing inversely proportional to the effective thickness of EDL. Two effects appear: first, the actual variation in dispersion due to coagulation–dispergation or the irreversible sticking of fine dispersed particles, and second, the seeming change of S upon the adsorption estimate due to the increasing or decreasing equivalent amount of adsorbate (the monolayer water) under the effect of temperature, growing or falling surface charge or its compensation by the pore solution ions.

For the highly charged surface of flat particles, using $a = 64C_0RT/\rho$ in Eq. (4), it seems easy to come up with the following relationship between the effective specific surface and dynamic factors of charge, ion concentration and absolute temperature:

$$S = \frac{aFz}{32b\sqrt{2\xi\xi_0 C_0 (RT)^3}}. \quad (9)$$

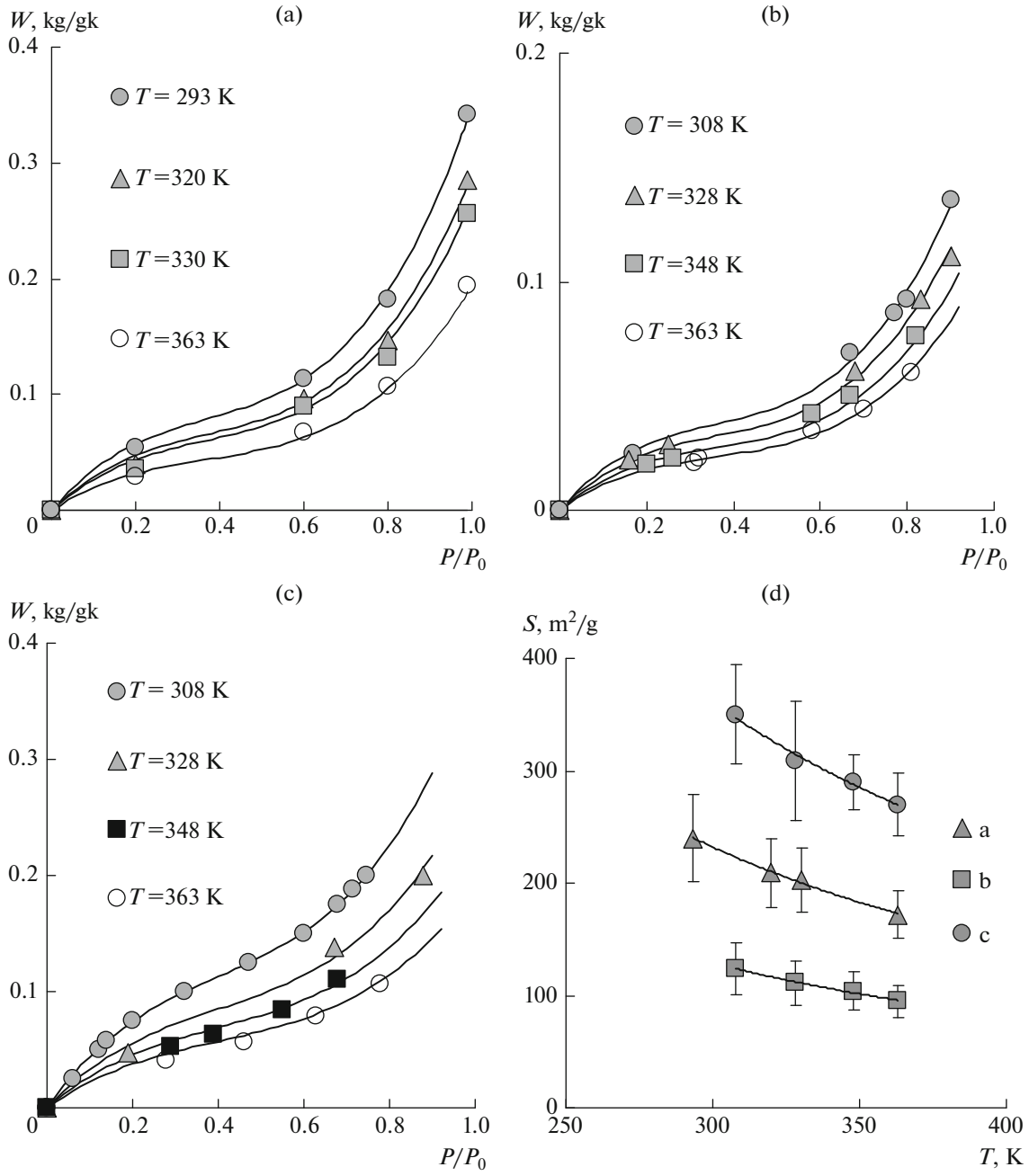


Fig. 4. Temperature influence on the isotherms of water vapor sorption (a–c) and the effective specific surface area (d) of colloidal disperse systems (the data from [10]): (a) timber, (b) clay, (c) brown coal; lines in Figs. (a–c) stand for approximation of isotherms by the polynomial model according to [36]; (d) approximation of S(T) relationship by the power model (9); model equations: (a) $y = 1.55 \times 10^6 \cdot x^{-1.54}$, $R^2 = 0.996$; (b) $y = 0.93 \times 10^6 \cdot x^{-1.56}$, $R^2 = 0.988$; and (c) $y = 2.21 \times 10^6 \cdot x^{-1.53}$, $R^2 = 0.986$.

This equation shows unambiguous tendency to decreasing S with the increasing temperature, which is proved by the experimental sorption isotherms [10, 26, 36] and may be related to the mitigating water retention capacity of particles (the monolayer water) upon intensification of the thermal movement of adsorbate particles, with coagulation of particles upon drying, or even with sticking CDC to coarse grain conglomerates at high temperatures (400–500°C) [40]. As an example, Fig. 4 shows the isotherms of water vapor desorption by colloidal-dispersion materials depending on the temperature according to data [10] and the results of their processing by model (9). A small amount of temperature levels and significantly varying S estimated by the sorption isotherms using the BET method do not allow us to confirm the statistical reliability of the obtained results (Fig. 4d) and the adequacy of the power model (9); however, it appears to

represent quite satisfactorily the qualitative trend to decreasing S with the growth of T ($R^2 = 0.98$–0.99) at the exponent −1.53...−1.56 close to the theoretical value −3/2.

The positive effect of the cation charge (z) on the CDC particle size is supported by the classical data obtained by Rode [14] for clay minerals presented in Fig. 5a after the recalculation of monolayer water to the S value. Monoionic mineral forms show a tendency to the increment of S upon the transition from univalent to bivalent cations; with the nearly two-fold difference between bi- and univalent forms being observed for montmorillonite (which fits best of all the ideal physical model of two-phase CDC), as proceeds from model (9).

The influence of electrolyte concentration (C_0) is seen from the data on WRC and the specific surface of drilling sludge [39] (Fig. 5b). Swelling in the distilled water manifests 3.6–4.3 times higher values of equilibrium water as compared to swelling in 0.1 and 1 M solutions for the similar water potential values (disjoining pressure). In doing so, the specific surface obtained from the isotherms of water vapor desorption by BET method (Fig. 5b, the inset) is 3–4 times lower in the options with salt solutions as compared to the distilled water, which is evidently due to the coagulation of fine-dispersed particles. At first, dispersion decreases abruptly, and with the further growth in concentration, the specific surface changes insignificantly. This may be related to the existence of critical salting-out concentration, above which CDC particles coagulate completely to join each other tightly. For highly charged surface, the comparison of the critical surface potential ($a = 64C_0RT/\rho$) and the surface molecular kinetic energy of adsorption monolayer formation, which is equal to RT/M (the inflection point on the sorption isotherm according to the biexponential model (5)), we come up with the critical value $C_0 = \rho/(64M)$ or about 0.87 M. The further increase in C_0 to 1 M and higher will not affect the particle size, since it has already reached its minimal point under the coagulating effect of electrolyte in the critical concentration.

It should be noted that the charge and concentration of ions affect the dispersion in an involved manner and not so unambiguously as temperature does. The tendencies implied by equation (9) may be disfigured and even change to opposite. In particular, the increasing valence of cations, according to (7) suppresses the ion-electrostatic barrier stabilizing the disperse system to result in coagulation of particles; this is accompanied by the decreasing water retention capacity in a wide range of absolute values of water potentials from first units to dozens of thousands KJ/kg. For monoionic forms of clay minerals this is proved by the classical data on tensiometry obtained by Mattson [18, 37], compression-test curves, and WRCs obtained by centrifuging [11, 18, 37]. In these cases, the actual

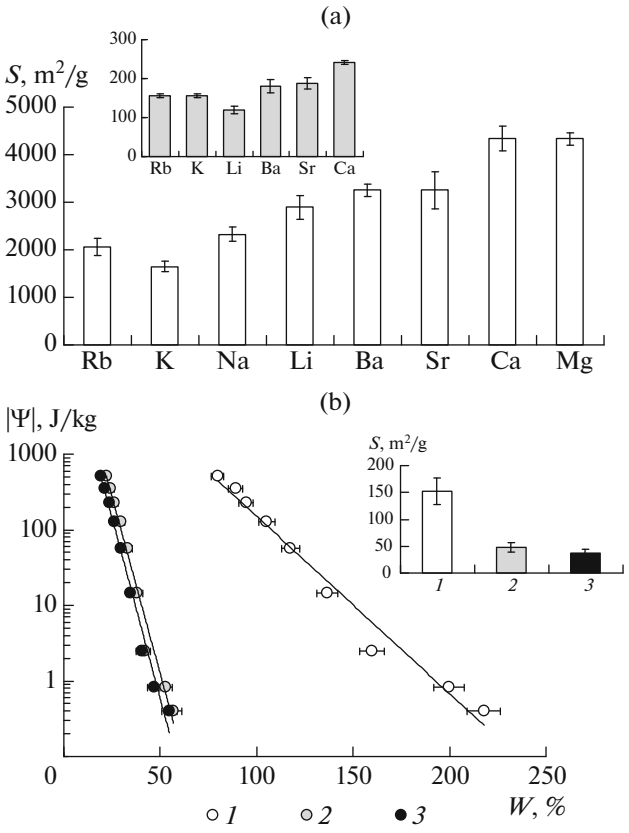


Fig. 5. The influence of cation charge (a) and pore solution concentration (b) on the specific surface and WRC of fine-disperse systems. Designations: (a) clayey minerals (after [14]): montmorillonite (main figure) and kaolinite (inset); (b) drilling mud (after [39]): WRC (main figure) and S (inset); (*1*) distilled water, (*2*) 0.1 M NaCl; (*3*) 1 M NaCl.

reduction of particle surface compensates for its increasing charge, which in its turn may result in decreasing the S value estimated according to the water sorption. The same for salinization effect, which (upon air-drying of soil rather than upon mechanical water removal) may produce the additional hygroscopic solid phase upon salt precipitation and, correspondingly, to up to 2–4-fold rise in the sorption of water vapor and effective specific surface area at 0.25–1 M concentration C_0 of soil-saturating electrolyte solution (Fig. 2a).

Standardized estimation of efficient specific surface area and energy indices of interphase interactions from WRC. Theoretically, the S value may change significantly for one and the same disperse system under the impact of EDL-controlling thermodynamic factors. Therefore, standardization is necessary for the comparative assessment of the degree of dispersion of soil objects. The basic model (8) implies the presence of S spectrum depending on the EDL characteristics in the form of Debye width of ion-electrostatic barrier λ between fine particles interacting through water layers. The starting point for the barrier (and, hence, for the

CDC stability as a two-phase system with separate particles and liquid interlayer) and the appearing disjoining pressure in it are characterized in the DLVO theory by the parameter of solvate layer critical thickness $h_{cr} = 2\lambda_{cr}$ [28]. From geometry, it is apparent that the minimal distance between the hydrated in monolayer surfaces of CDC particles is equal to two diameters of water molecules. Hence, the minimal λ_{cr}, for which the disperse system divided by the monomolecular liquid layer ($h_{cr} = 2d$) still remains aggregatively stable, must be equal to the molecular diameter of water ($\lambda_{cr} = 2d/2 = d = 2r$). This system status, which is conventionally taken as a standard, fits the standard effective specific surface area (S_{st}), which may be calculated from the following equation derived by substituting $\lambda_{cr} = 2r$ to the basic equation (8):

$$S_{st} = \frac{1}{2b\rho r}. \quad (10)$$

According to this equation, dispersion in the standard state turns out to be invariant with respect to dynamic factors (temperature, charge, and ion concentration), being controlled by the only one parameter—*inclination b of soil WRC linearized in semi-logarithmic coordinates*.

There are grounds to correlate the standard state and the critical water content W_0, which is equal to the maximum water adsorption capacity (according to Voronin [2]), or the only singular inflection point on the S-shaped isotherms of water vapor sorption by soils [2, 36, 37]. In paper [36], it was shown that for the biexponential model of sorption isotherms (5), the inflection point always has a constant ordinate $P/P_0 = \exp(-1) \approx 0.37$ with the abscissa (the maximum water adsorption capacity) being determined by the a and b parameters:

$$W_0 = \ln\left(\frac{aM}{RT}\right)\Big/b. \quad (11)$$

Substituting (11) to the basic model (4), we come up with:

$$\Psi_{st} = \frac{RT}{M}. \quad (12)$$

This value (Ψ_{st}) may be called *the standard potential of EDL formation* pointing to the appearance of the related phenomenon of disjoining pressure at $W = W_0$. Crossing the straight line described by the ordinate $\Psi_{st} = RT/M$ (135 333 J/kg at T=293 K) with the WRC lines linearized in semi-logarithmic coordinates gives us the abscissa corresponding to the maximum water adsorption capacity, or the initial EDL water and the appearing disjoining pressure in CDC of polydispersed system (see dashed line in Fig. 3).

Numerically, S_{st} should be close to the dispersion estimated from the adsorption monolayer according to the BET theory (SBET), which also presumes the monomolecular coating of solid phase surface by the adsorbate. This supposition is proved by experimental data (Table 1, Fig. 6) of S estimates by the BET method according to sorption isotherms, as well as by the suggested method of WRC inclination with the calculation according to Eq. (10) for the known crystallochemical radius of water molecule $r = 1.38 \times 10^{-10}$ m [46]. For a wide range of compared dispersion values from 2 to 450 m^2/g, a close correlation was obtained with the Pearson coefficient $r > 0.99$. In this correlation, parameters a and b in the linear regression equation $y = ax + b$ for S_{st} and S_{BET} values did not differ statistically reliably from 1 and zero, respectively, which attests to the virtual similarity of the compared indices.

For the independent verification of the new method of dispersion assessment according to the inclination of the linear section of WRC in semi-logarithmic coordinates, we borrowed the data from monograph [11] with wide ranges of soil water pressure (0.1–2300 atm) and specific surface (2.6–300 m^2/g) (Fig. 7). The linear section grew with the increasing dispersion from the first percent of water in coarse-grained soils and coarse fractions up to 50–100% in the samples of fine-dispersed soils, clay minerals, and clay. Table 2 and the insets to Figs. 6 and 7 show the WRC approximation parameters in model (4) and S_{st} values calculated on this basis. As is seen, the independent assessment based on published data has confirmed completely the above statement on the full correspondence of the new method of specific surface area determination by the WRC inclination to the routine in soil science and soil engineering BET method.

In conclusion, let us consider the energy characteristics of interphase interactions according to the proposed model. The a/b ratio in Eq. (4) evidently stands for the overall energy of water retention (E) by the solid phase in disperse system (dimension J/kg of solid phase) defined as an integral of the thermodynamic potential function of water in the limits from $W = 0$ to $W \to \infty$ (the maximal dilution of soil with water to the state of free disperse system) [37, 41]. Theoretically, this value is equal to the product of specific surface energy (the interphase surface tension ($\sigma_{s/l}$)) and the specific surface of disperse system: $E = a/b = \sigma_{s/l}S$. By combining this equation with (10), we may estimate $\sigma_{s/l}$ index and find it from the generalized Hamaker constant for molecular interactions as $A_G = 24\pi r^2\sigma_{s/l}$ [28, 37]. The resulting equations will look like:

$$\sigma_{s/l} = 2ar\rho, \quad (13)$$

$$A_G = 48\pi a\rho r^3. \quad (14)$$

As is seen, they do not depend on the specific surface and are only controlled by the energy parameter a in the WRC model (4). The values of generalized Hamaker constant (Tables 1 and 2) estimated from (14) for the effective molecular radius $r = 1.38 \times 10^{-10}$ m was found to be of 10^{-19} J order, which is typical of the lyophobic disperse systems with the molecular inter-

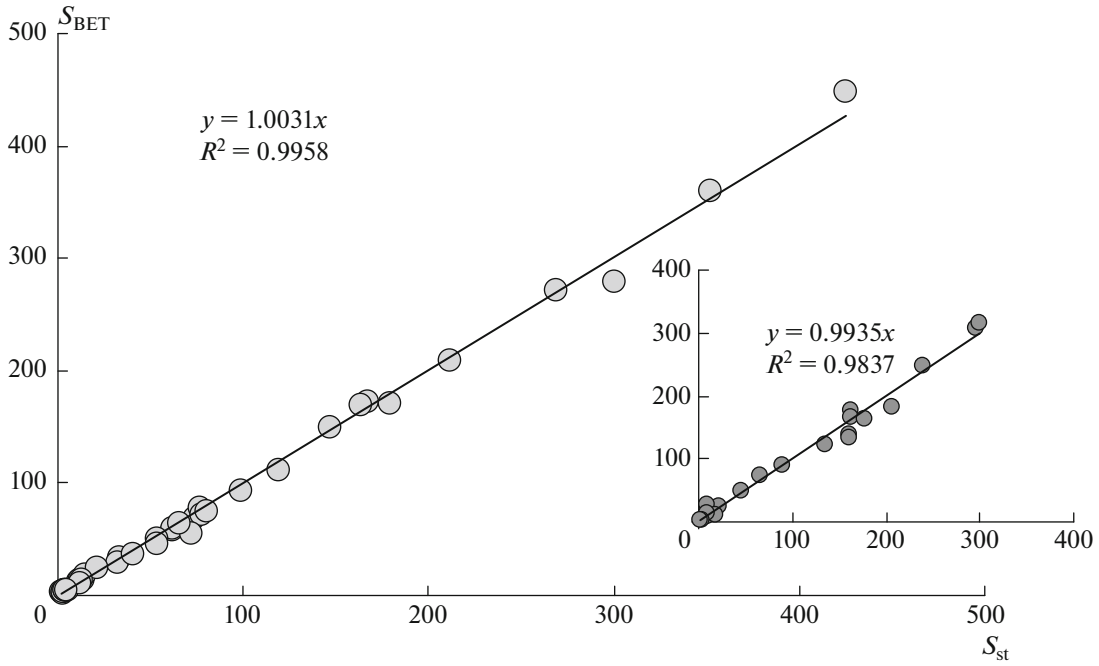


Fig. 6. Correlation of specific surface estimates by the WRC inclination (S_{st}) and by the BET method (S_{BET}). Dimensions of value S, m^2/g; the main figure: the data obtained by the author on WRC; $n = 48$ samples, the Pearson correlation coefficient $r = 0.996$; the inset: WRC data [11], $n = 20$ samples (see Table 2), $r = 0.992$.

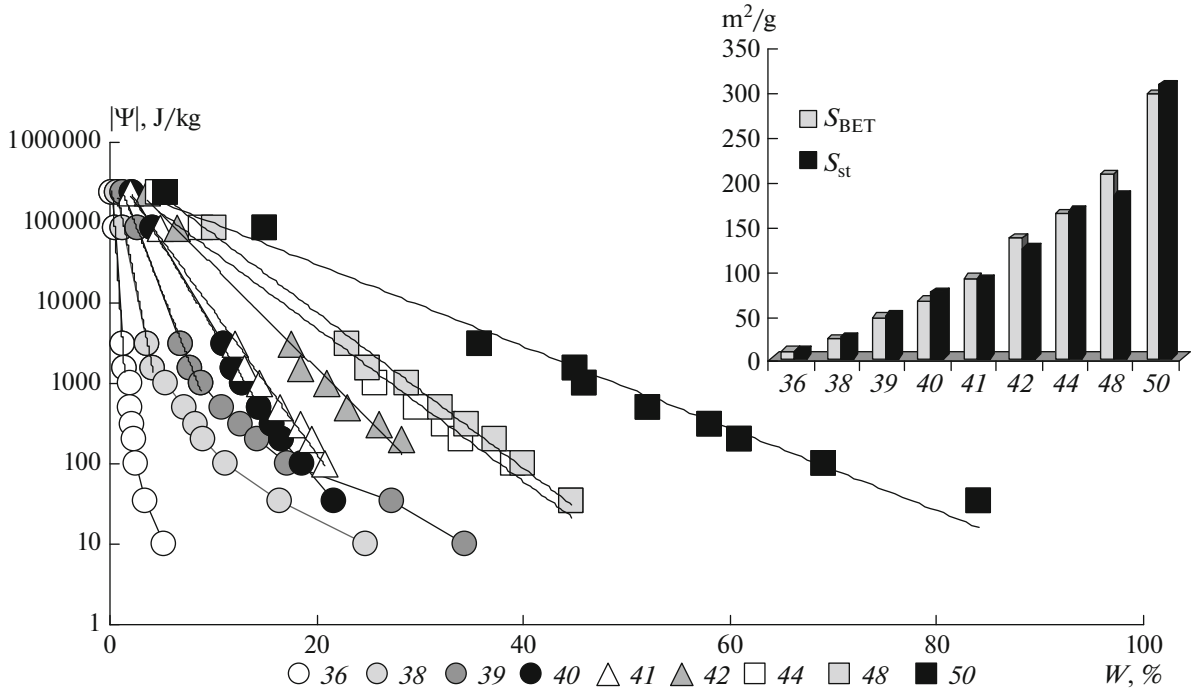


Fig. 7. WRC of zonal soils and clay minerals according to data from [11] (the main figure) and the effective specific surface area assessment by the inclination as compared to the BET method (the inset). Symbols stand for the experimental data, straight lines are their approximations by model (4); see Table 2 for sample enumeration.

Table 2. Assessment of specific surface indices and generalized Hamaker constants according to the WRC of disperse system samples borrowed from [11]

No.	Sample	S_{BET}, m^2/g	$\ln a$, J/kg	b, kg/kg	R^2	S_{st}, m^2/g	A_G, $J \times 10^{-19}$
31	Fine sand	2.6	12.92	17.604	0.995	2.1	1.6
32	Coarse silt	4.5	13.77	12.960	0.996	2.8	3.8
33	Medium silt	10.0	12.59	2.930	0.803	12.4	1.2
34	Fine silt	18.0	13.82	3.370	0.994	10.8	3.9
35	Kaolinite	10.0	12.35	1.2815	0.974	28.3	9.1
36	Chestnut soil	8.3	13.42	4.403	0.998	8.2	2.7
37	Sierozem	19.0	13.51	2.228	0.999	16.3	2.9
38	Alluvial soil	22.0	13.39	1.467	0.997	24.7	2.6
39	Chernozem	46.0	13.32	0.753	0.996	48.1	2.4
40	Sierozem	65.0	13.37	0.492	0.999	73.6	2.5
41	Soddy-podzolic	90.0	13.09	0.410	0.993	88.4	1.9
42	Chernozem	135.0	13.21	0.294	0.989	123.2	2.2
43	Clayey soil	161.0	12.95	0.274	0.97	132.2	1.7
44	Gray forest soil	163.0	12.87	0.219	0.976	165.4	1.5
47	Chernozem	177.0	13.17	0.222	0.972	163.2	2.1
48	Smolnitsa	206.0	12.85	0.199	0.994	182.1	1.5
49	Montmorillonite	240.0	13.04	0.147	0.97	246.5	1.8
50	Bentonite	296.0	12.68	0.118	0.971	307.0	1.3
51	Silt	300.0	12.47	0.114	0.951	317.8	1.0

Data on S_{BET} are taken from [11].

actions through the equilibrium liquid interlayers corresponding to the first (near) minimum in the interaction potential [28]. Earlier, the same conclusion was derived in [35] for soils and colloidal minerals upon the A_G assessment by the isotherms of water vapor adsorption and strength curves for coherent disperse systems using the fundamental Griffiths equation.

CONCLUSIONS

(1) Ion-electrostatic mechanism ensures the aggregative stability of particles in colloidal-disperse complex of soils (CDC) and water adsorption (disjoining pressure) in the range of sorption and film water, which corresponds to the linear WRC section in semilogarithmic coordinates. WRC data in this diapason may be obtained by the combination of vapor desorption (adsorption-static and dynamic methods, thermal desorption) to the values not exceeding the maximum hygroscopic water content and the mechanical removal of water (by centrifuge or press).

(2) The width of this range is determined by the CDC portion in the particle-size composition of soils and by the factors of their aggregative stability (the efficient width of EDL). In coarse-grained and aggregated macroporous media, this range does not exceed several percent of water, whereas in fine-dispersed bodies, including heavy-textured soils, clay fraction, and clay minerals, it may reach 30–100% of water in relation to the solid phase mass.

(3) In the stable separate-particle state, CDC spends the extra surface energy for the direct (adsorption, orientation of water molecules) or indirect binding of water through the EDL formation, the ions of which may be considered as surface continuation (bifurcation) in the soil liquid phase.

(4) The effective width of EDL that determines the aggregative stability of CDC and water retention (the disjoining pressure of film water) is controlled by the dynamic factors, i.e., temperature, the charge of exchangeable ions, and their concentration in the soil solution. This produces the phenomenon of dynamics of dispersion (effective specific surface area) and water retention capacity of colloidal-disperse bodies (soils and heavy-textures sediments, swelling clay minerals, and gels) upon changes in the composition and concentration of liquid phase and the methods of its removal (evaporation or mechanical removal of water) in wetting-drying cycles.

(5) Under the conventionally standard state of CDC stability with monomolecular solvate layers, the effective specific surface area is unambiguously determined by the WRC inclination in semilogarithmic coordinates. The assessment of standard specific surface by the WRC inclination complies with that obtained from the BET method by the isotherms of

water vapor desorption for all studied samples in a wide range from 2 to 450 m^2/g.

(6) In addition to the assessment of the effective specific surface area, the ion-electrostatic model permits assessing energy parameters of surface interactions in the form of generalized Hamaker constants, the values of which varied within $(1–10) \times 10^{-19}$ J for the studied samples.

In conclusion, let us emphasize once again that the effective specific surface area is not a constant; it depends in many respects on the dynamic factors of aggregative stability of colloidal complex. This suggests the possible regular dynamics of dispersion in the systems with variable water content in the wetting-drying cycles, the quantitative estimation of which should be the topic of further studies and methodological developments in this area.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Russian Science Foundation (project nos. 16-16-04014 and 17-77-20046). The author is grateful to Prof. I.I. Sudnitsyn for the long-term fruitful discussion about the mechanisms of water retention capacity in soils studied in this paper.

REFERENCES

1. I. S. Belyuchenko, A. V. Smagin, L. B. Popok, and L. E. Popok, *Data Analysis and Mathematical Modeling in Ecology and Nature Management* (Kuban State Agricultural Univ., Krasnodar, 2015) [in Russian].
2. A. D. Voronin, *Structural-Functional Hydrophysics of Soils* (Moscow State Univ., Moscow, 1984) [in Russian].
3. A. D. Voronin and V. D. Skalaban, "Ratio between full, capillary-sorption, and osmotic potential of water in soil," Pochvovedenie, No. 12, 121–125 (1978).
4. N. E. Galiullina, M. G. Khramchenkov, E. M. Khramchenkov, A. N. Chekalin, and V. V. Mikhailov, "Specific models of mechanics of multiphase grounds," Vopr. At. Nauki Tekh., Ser.: Matem. Model. Fiz. Protsess., No. 3, 45–51 (2011).
5. A. M. Globus, *Soil-Hydrophysical Support of Agroecological Mathematical Models* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987) [in Russian].
6. A. M. Globus, "Fractal character of some physical parameters of soils," Eurasian Soil Sci. **39** (10), 1116–1126 (2006).
7. J. Gregg and K. S. W. Sing, *Adsorption, Surface Area, and Porosity* (Academic, London, 1982; Mir, Moscow, 1984).
8. S. I. Dolgov, A. A. Zhitkova, and G. B. Vinogradova, "Hydrosorption hysteresis of soil," in *Physics, Chemistry, Biology and Mineralogy of Soils* (Nauka, Moscow, 1964) [in Russian].
9. Yu. V. Egorov, I. I. Sudnitsyn, and A. V. Kirichenko, "Possibilities of using the Landau–Deryagin law to evaluate soil degradation as a result of its contamination with chlorides," Moscow Univ. Soil Sci. Bull. **71**, 165–170 (2016).
10. A. V. Lykov, *Theory of Drying* (Gosenergoizdat, Moscow, 1950) [in Russian].
11. B. N. Michurin, *Energy of Soil Moisture* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1975) [in Russian].
12. K. G. Moiseev and V. V. Terleev, "Modeling of the structure of capillary-porous media and calculation of differential porosity of soil," Agrofizika, No. 3, 43–56 (2017).
13. S. V. Nerpin and A. F. Chudnovskii, *Soil Physics* (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
14. A. A. Rode, *Selected Research Works*, Vol. 3: *Basic Theory on Soil Moisture* (Dokuchaev Soil Science Inst., Moscow, 2008) [in Russian].
15. V. V. Sirotkin and V. M. Sirotkin, *Applied Hydrophysics of Soils* (Cheboksary State Univ., Cheboksary, 2001) [in Russian].
16. A. V. Smagin, "Soil-hydrological constants: physical meaning and quantitative evaluation based on equilibrium centrifugation," Dokl. Ekol. Pochvoved. **1** (1), 31–56 (2006).
17. A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, M. V. Glagolev, and A. V. Kirichenko, "New instrumental methods and portative electronic devices for control of ecological status of soils and associated media," Ekol. Vestn. Sev. Kavk. **2** (1), 5–17 (2006).
18. I. I. Sudnitsyn, A. V. Smagin, and A. P. Shvarov, "The theory of Maxwell–Boltzmann–Helmholtz–Gouy about the double electric layer in disperse systems and its application to soil science (on the 100th anniversary of the paper published by Gouy)," Eurasian Soil Sci. **45**, 452–457 (2012).
19. *Theories and Methods of Soil Physics* (Grif i K, Moscow, 2007) [in Russian].
20. V. V. Terleev, W. Mirschel, V. L. Badenko, and I. Yu. Guseva, "An improved Mualem–Van Genuchten method and its verification using data on Beit Netofa clay," Eurasian Soil Sci. **50**, 445–455 (2017).
21. V. V. Terleev, W. Mirschel, V. L. Badenko, I. Yu. Guseva, and P. D. Gurin, "Physical-statistical interpretation of the parameters of the soil water retention function," Agrofizika, No. 4, 1–8 (2012).
22. V. V. Terleev, A. G. Topaj, and W. Mirschel, The improved estimation for the effective supply of productive moisture considering the hysteresis of soil water-retention capacity," Russ. Meteorol. Hydrol. **40**, 278–285 (2015).
23. V. V. Terleev, A. G. Topaj, W. Mirschel, and P. D. Gurin, "Modeling the main drainage and moistening branches of hysteretic loop inherent for the soil water-retention capacity," Agrofizika, No. 1, 22–29 (2013).
24. G. N. Fedotov, G. V. Dobrovol'skii, and S. A. Shoba, "On the mechanism of nanostructural organization of soil gels," Dokl. Biol. Sci. **445**, 268–271 (2012).
25. G. N. Fedotov, E. V. Shein, V. I. Putlyaev, T. A. Arkhangel'skaya, A. V. Eliseev, and E. Yu. Milanovskii, "Physicochemical bases of differences between the sedimentometric and laser-diffraction techniques of soil particle-size analysis," Eurasian Soil Sci. **40**, 281–288 (2007).

26. D. D. Khaidapova, "Influence of temperature on desorption of moisture in light-chestnut heavy loamy soil," *The Conference of the Commonwealth Countries "Soil Physics and Ecological Problems," Abstracts of Papers* (Pushchino, 1992), p. 112.
27. M. G. Khramchenkov and R. Kh. Khramchenkova, "Theoretical hydrophysics of swallowing soils," Georesursy, No. 1, 17–20 (2006).
28. E. D. Shchukin, A. V. Pertsov, and E. A. Amelina, *Colloidal Chemistry* (Moscow State Univ., Moscow, 1982) [in Russian].
29. G. S. Campbell, *Soil Physics with BASIC* (Elsevier, Amsterdam, 1985).
30. A. R. Dexter, "Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth," Geoderma **120**, 201–214 (2004).
31. K. Kosugi, "Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties," Water Resour. Res. **32**, 2697–2703 (1996).
32. Ya. A. Pachepsky, D. Timlin, and G. Varallyay, "Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data," Soil Sci. Soc. Am. J. **60**, 727–733 (1996).
33. E. V. Shein and T. A. Arkhangel'skaya, "Pedotransfer functions: state of the art, problems, and outlooks," Eurasian Soil Sci. **39**, 1089–1099 (2006).
34. J. Simunek, M. Th. van Genuchten, and M. Sejna, *The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media: Technical Manual, Version 1.0* (PC Progress, Prague, 2006).
35. A. V. Smagin, "Experimental estimation of the energy parameters of molecular interactions in soils," Colloid J. **70** (4), 473–477 (2008). doi 10.1134/S1061933X0804011X
36. A. V. Smagin, "Physically based mathematical models of the water vapor sorption by soils," Eurasian Soil Sci. **44**, 659–669 (2011). doi 10.1134/S1064229311060135
37. A. V. Smagin, "Theory and methods of evaluating the physical status of soils," Eurasian Soil Sci. **36**, 301–312 (2003).
38. A. V. Smagin, "Thermodynamic evaluation of the impact of strongly swelling polymer hydrogels with ionic silver on the water retention capacity of sandy substrate," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **52** (012087), 1–7 (2017). doi 10.1088/1755-1315/52/1/01208710.1088/1755-1315/52/1/012087
39. A. V. Smagin, I. N. Kol'tsov, I. L. Pepelov, A. V. Kirichenko, N. B. Sadovnikova, and R. R. Kinzhaev, "The physical state of finely dispersed soil-like systems," Eurasian Soil Sci. **44**, 163–172 (2011). doi 10.1134/S1064229311020128
40. A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, A. S. Bashina, A. V. Kirichenko, and V. G. Vityazev, "Theoretical and experimental substantiation of a thermogravimetric method for assessing the water-retention capacity and specific surface area of disperse systems," Eurasian Soil Sci. **49**, 1382–1391 (2016). doi 10.1134/S1064229316100136
41. I. I. Sudnitsyn, "Landau–Deryagin law and hydration energy of soils of different genesis," Moscow Univ. Soil Sci. Bull. **72**, 106–112 (2017). doi 10.3103/S0147687417030085
42. V. Terleev, A. Nikonorov, V. Badenko, I. Guseva, Yu. Volkova, O. Skvortsova, S. Pavlov, and W. Mirschel, "Modeling of hydrophysical properties of the soil as capillary-porous media and improvement of Mualem–van Genuchten method as a part of foundation arrangement research," Adv. Civil Eng. **2016** (8176728), (2016).
43. V. Terleev, E. Petrovskaia, A. Nikonorov, V. Badenko, Y. Volkova, S. Pavlov, N. Semenova, K. Moiseev, A. Topaj, and W. Mirschel, "Mathematical modeling the hydrological properties of soil for practical use in the land ecological management," MATEC Web Conf. **73** (03001), (2016).
44. M. T. van Genuchten, "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Sci. Soc. Am. J. **44**, 892–898 (1980).
45. J. G. Wesseling, *Soil Physical Data and Modeling Moisture Flow* (Alterra, Wageningen, 2009).
46. Water molecule structure. http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_molecule.html.

Translated by O. Eremina

DOI 10.1007/s10891-019-01984-w

IONIC-ELECTROSTATIC MODEL OF THE WEDGE PRESSURE AND SPECIFIC AREA OF COLLOIDAL SYSTEMS

A. V. Smagin

UDC 631.4

A physically substantiated ionic-electrostatic model of the wedge pressure by Deryagin, modified for definition of the water retentivity of natural and artificial colloidal dispersions with a variable moisture content (soils, grounds, clay minerals, wood, caustobioliths, synthetic polymeric hydrogels), is considered. In this model, the relation between the moisture content and dispersivity (effective specific area) of a colloidal system serves as a phase variable. For the first time, with the use of the sorption-equilibrium, moisture-thermodesorption, and equilibrium-centrifugation methods, wedge-pressure isotherms, representing the dependence of the thermodynamic moisture potential (specific Gibbs energy) of a material on the mass fraction of moisture in it, were obtained for materials different in genesis and dispersivity, whose thermodynamic moisture potential varies in absolute value within the wide range 0.1–260 kJ/kg, and the wedge pressure of colloid-bonded disperse systems was quantitatively estimated with regard for the variable factors (temperature, composition, liquid-phase concentration) of the aggregative stability of their colloidal complex determining the phenomenon of dynamics of the dispersivity and water retentivity of such systems. A methodology of calculating the effective specific area of a material by the slope of its wedge-pressure isotherms, constructed at the logarithmic scale, is proposed as an alternative to the standard Brunauer–Emmett–Teller method. The new method is close to the traditional one in the specific area of a material obtained with them, but the method proposed differs favorably from the standard method by the temperature invariance and the possibility of calculating the energy of interphase interactions in the material with the use of the generalized Hamaker constant.

Keywords: colloidal system, gels, thermodynamics, dispersivity, specific area, wedge-pressure isotherms, electric double layer, interphase interactions.

Introduction. The interaction of phases at their interface in colloidal systems determines the physical state and dynamics of these systems as well as the vital functions performed by them in natural and anthropogenic landscapes. It is thought that the thermodynamic approach to the quantitative estimation of the interfacial interaction in a dispersion medium holds the greatest promise [1–5] because, in it, as a basic parameter, the dependence of the thermodynamic moisture potential (the specific Gibbs energy) of the medium on the content of moisture (the mass fraction of moisture) in it is used. This dependence allows one to estimate the interfacial interaction energy in soils, grounds, and other dispersion media, determining their main physical properties and functions. Moreover, the indicated dependence forms the basis for the phenomenological definition of the moisture transport in porous media and, accordingly, the basis for computer models of the energy and mass exchange in soils, grounds, and intermediate media [6, 7]. Traditionally, this dependence is thought of as being empirical, and it is determined by the content of moisture in a medium on the assumption that the dispersivity of the medium has a constant value, i.e., it mainly defines the interaction of the liquid and solid phases in the medium [1–3, 6–8]. Only in few works were efforts made to estimate the energy state of dispersion media (soils, grounds) and the moisture transport in them with account of the interaction of particles with each other through the layers in a medium, the stability of the medium, its aggregation and dispersion, and the formation of gel structures in the medium (its gelatinization) [2, 4, 9–11]. The physicochemical background of the phenomenon being considered is provided by the classical Deryagin–Landau–Fairway–Overbeck (DLFO) theory, which has been further developed at a later time in works of the Deryagin school [12, 13]. In our opinion, it is possible in principle to construct a model of the water retention of soils and grounds on the basis of fundamental propositions of the indicated theory, in particular, with the use of the equation for the ionic-electrostatic component of the wedging pressure by

M. V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119992, Russia; Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, 21 Sovetskaya Str., Uspenskoe, Moscow Region, 143030, Russia; email: smagin@list.ru.
Translated from Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal, Vol. 92, No. 3, pp. 769–780, May–June, 2019. Original article submitted October 6, 2017.

0062-0125/19/9203-0744 ©2019 Springer Science+Business Media, LLC

Deryagin [4, 14]. In such a model, the parameters of the physical state of a disperse system, along with its thermodynamic potential and the mass fraction of moisture in it, will be the dispersivity (the effective specific area) of the system that theoretically can change as a result of the interaction of colloidal particles with each other in the system and can be dependent on the factors controlling the size of the ionic-electrostatic barrier or the effective thickness of the electric double layer (EDL). In this case, there appears an alternative to the standard Brunauer–Emmett–Teller (BET) method [15] for calculating the effective specific area of a material by its wedge-pressure isotherms (WPI). The aim of the present work is to develop such an alternative method of estimating the effective specific surface of a disperse system.

Investigation Methods and Objects. The investigation objects were the wedge-pressure isotherms of 48 samples of soils and grounds, different in genesis and dispersivity, and of finely-dispersed media representing clay minerals, wood, caustobioliths, and highly swollen polymeric hydrogels used in modern agriculture for increasing the water retentivity of soils and optimizing the rhizosphere [16]. A numerical list of the main set of samples of the materials being investigated with indication of their effective specific area estimated by the BET method is given in Table 1: 1) montmorillonite, 2) Akvasob acrylic hydrogel (France), 3) VUM-0 acrylic hydrogel (Ural Chemical Plant), 4) PM-1 acrylic hydrogel with a peat filler (Ural Chemical Plant), 5–7) brown coal (lignite) at different temperatures, 8) peaty bog lowland soil (horizon T), clay vertisol (horizon A, Tunisia), 10) brown forest heavy-loamy soil (horizon A), 11) ordinary medium-loamy chernozem (horizon A_{ar}, arable layer), 12) chestnut medium-loamy soil (horizon A_{ar}), 13) saline soil (horizon AE), 14) turf-podzol medium-loamy soil (horizon A), 15) gray forest light-loamy soil (horizon A_{ar}), 16, 17) alluvial light clay loam (horizon A, Vietnam), 18, 19) typical heavy-loamy chernozem (horizon A_{ar}), 20, 21) dark chestnut medium-loamy soil (horizon A_{ar}), 22, 23) turf-podzol sandy-loamy soil (horizons A, B, and C), and 27, 28, 29, 30) turf coniferous-forest sandy soil (horizons A, B, BC, and C).

We first measured the water-vapor desorption and adsorption isotherms of materials, held preliminarily in an atmosphere with a constant relative vapor pressure P/P_0 during four–five weeks, by the adsorption-static method [17] and the dynamic method in flows of a humid gas and a dry gas-carrier with the use of a LKhM-80m gas chromatograph (detector katharometer) or a programmed DS1932 hydrometer designed for recording the relative atmospheric humidity [18, 19]. Along with the results of our experimental investigations, we considered classical data of Academician A. V. Luikov [20] and S. I. Dolgov [21] on the adsorption and desorption of water vapor by soils and other dispersion media at different temperatures.

By the water-vapor sorption isotherms of a material, representing the dependence of the mass fraction of moisture W in it on the ratio P/P_0, we calculated the wedge-pressure isotherms of the material in the form of the dependence of its thermodynamic moisture potential (wedging pressure) on the content of moisture in it with the use of the known thermodynamic relation [3]

$$\psi = RT/M \ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (1)$$

where R is the universal gas constant. Since the application of sorption-equilibrium methods is usually limited by the range of the P/P_0 values from 0.15 to 0.98 [17], the thermodynamic moisture potential of the materials being investigated, corresponding to their wedge-pressure isotherms constructed in accordance with (1) for the room temperature 293 K, was varied in absolute value from 2.7 to 256.7 kJ/kg. Additional data on the dependence of the thermodynamic moisture potential of a material on its moisture content beyond the indicated range have been obtained by the equilibrium-centrifugation method [4] and the method of temperature moisture desorption [22].

The experimental wedge-pressure isotherms were approximated by theoretical models with the use of the least square method and the nonlinear Wizard regression algorithms built into the Sigma Plot program of the ninth version. With this program, we estimated nonlinear-regression parameters, their variants in the form of corresponding standard deviations, the statistical significance of parameters (their difference from zero), and their main statistical characteristics (the confidence factor R^2 and the standard approximation error s).

Results and Discussion. We now formulate positions on the water retentivity and dispersivity (effective specific area) of colloidal dispersions, forming the basis of the model proposed. In this model, unlike the capillary model used traditionally for soils and grounds [1–3, 17], the thermodynamics of the thin layers (films) of moisture bonded by the surface of the solid phase in a dispersion medium is taken into account. The water retentivity and dispersivity of such a polydisperse system are mainly determined by its colloidal complex representing a gel with symmetric films of moisture [2, 4, 23]. The most probable physical model of this complex comprises plane-parallel solid particles with an electric double layer, separated by the liquid-phase interlayer [12]. The water retentivity and dispersivity of the colloidal complex of a two-phase disperse system are determined by the competitive interactions of solid-phase particles with each other and with the liquid phase in it [4].

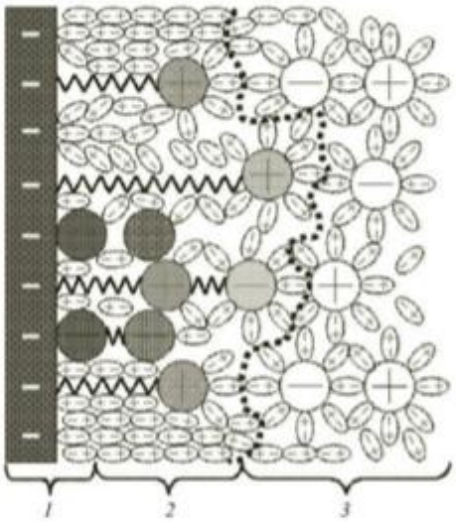


Fig. 1. Diagram of the ionic-electrostatic mechanism of the retention of water by the colloidal complex of a binary electrolyte: 1) plane surface of a solid-phase particle with a negative charge and adsorption layer; 2) diffusion EDL with a branched boundary (dotted line); 3) free soil solution.

The finely dispersed particles, stabilized by the ionic-electrostatic barrier, in a polydisperse system possess the highest dispersivity and excess surface energy which is expended for the retention of water in the system. When this barrier is broken down, particles in the system come in contact with each other (coagulate), and the dispersivity and surface energy of the system and, consequently, its water retentivity decrease. Thus, the dispersivity and water retentivity of a colloidal system are determined not only by the properties of the solid phase of the system but also by the properties of its liquid phase, the composition and concentration of whose components determine the aggregative stability of the colloidal particles in accordance with the DLFO theory. The energy binding the ions of the EDL in a solid particle with its surface in a disperse system is higher than the energy of their hydration, which gives rise to the known effects of "insoluble volume," "zero conductivity," and "zero osmotic pressure" in a part of the bound moisture in soils, grounds, and other dispersion media [2, 4, 24]. Thus, the main contribution to the water–retention of a dispersion medium is made by the surface of its colloidal particles, and their diffusion EDL serves as a peculiar continuation (branching) of this surface. In this case, a fractal interface can be formed in the medium, decreasing its effective specific area (increasing the effective size of the colloidal particles) in proportion to the widening of the electric double layer.

The ionic-electrostatic mechanism of the retention of water by the colloidal complex of a binary electrolyte is presented in Fig. 1. In this figure, the spheres and ovals with charge signs represent ions and polar molecules of water (the richness of the color of the ions diminishes with decrease in their bonding with the surface of a solid particle, and the bonds of the EDL ions with the counterions adsorbed on this surface are denoted by the "springs" that can "extend" as a result of the thermal motion of ions but cannot break unlike the bonds of the ions of the free soil solution beyond the EDL). The idea of this structural organization of soil gels was expressed for the first time and borne out at the qualitative level with the use of electron microscopy in [23, 25]. In the range of stability of the finely dispersed particles in a disperse system, the forces of their ionic-electrostatic repulsion, arising in the case where these particles approach each other with a partial overlap of their electric double layers, dominate over the molecular forces of the attractive interaction of the particles, which gives rise to the wedge-pressure effect with absorption of moisture by the disperse system in accordance with the exponential law (the wedge-pressure equation of Deryagin [12]).

Taking into account the above assumptions, we write the fundamental Deryagin equation for the thermodynamic moisture potential of a physical soil system with a wedge pressure [4]:

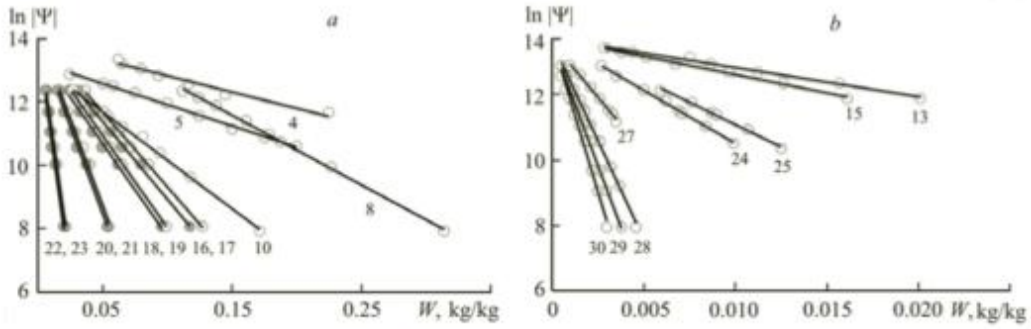


Fig. 2. Wedging-pressure isotherms of colloid-bonded disperse systems and their approximation by the ionic-electrostatic model (2): a) colloidal dispersions different in dispersivity; b) soils and subsoils horizons (grounds); digits) numbers of samples.

$$|\Psi| = a \exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right) = a \exp\left(-\frac{W}{S\rho\lambda}\right) = a \exp\left(-bW\right), \quad (2)$$

$$b = 1/S\rho\lambda . \quad (3)$$

The effective thickness of the EDL of the plane-parallel particles in an electrolyte with symmetric films of moisture is calculated by the formula [26]

$$\lambda = \frac{1}{Fz}\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 RT}{2C_0}}, \quad (4)$$

where z is the ion valence. The adequacy of model (2) is supported by the results of approximation, with it, of the experimental wedge-pressure isotherms obtained for the wide class of disperse systems different in genesis and dispersivity (Fig. 2). The statistically certain values of the parameters ln a and b of these systems, characterized by the confidence intervals at a significance level $p \leq 0.001$, the large confidence factor $R^2 = 0.980–0.999$, and the small approximation error $s = 0.02–0.19$, are presented in Table 1. The consistency of many experimental data on the water retentivity of soils and grounds with the empirical exponential dependence $|\Psi| = a \exp(-bW)$ and its linear analog, constructed in a semilogarithmic scale, $\ln|\Psi| = \ln a - bW$ is well known in soil and ground sciences [8, 14, 27]. The authors of [4] were, probably, the first to give a fundamental interpretation of the indicated fact on the basis of the Deryagin equation. At present, analogous ideas are being developed in works performed at the Chair of Physics of the M. V. Lomonosov Moscow State University [14, 28].

Of special interest is the physically-substantiated estimation of the dispersivity of colloidal systems by model (2), which represents a scientific-methodical significance of the present investigation. In view of (3), we obtain a simple expression for estimating the dispersivity (effective specific area) of such a system:

$$S = 1/b\rho\lambda . \quad (5)$$

As is seen from (5), the dispersivity of a colloidal system is determined by the two parameters representing the slope of its wedging pressure isotherms b and the effective thickness of the EDL λ. In [29], an empirical inversely proportional dependence of the WPI slope of a dispersion medium on its dispersivity has been obtained for the soils and grounds in the series from sands to high-fusing clays. The theoretical expression (2) allows one to obtain an analogous result at λ = const. At the same time, since the effective thickness of the EDL in a disperse system depends, according to (4), on the temperature of the system and the concentration of ions in its pore fluid and their charge, the effective specific area of such a system with a wedge pressure can markedly increase or decrease inversely with the effective thickness of the EDL. In this case, evidently, there arise two effects: a real change in the dispersivity of a material, caused by the coagulation and dispersion of finely

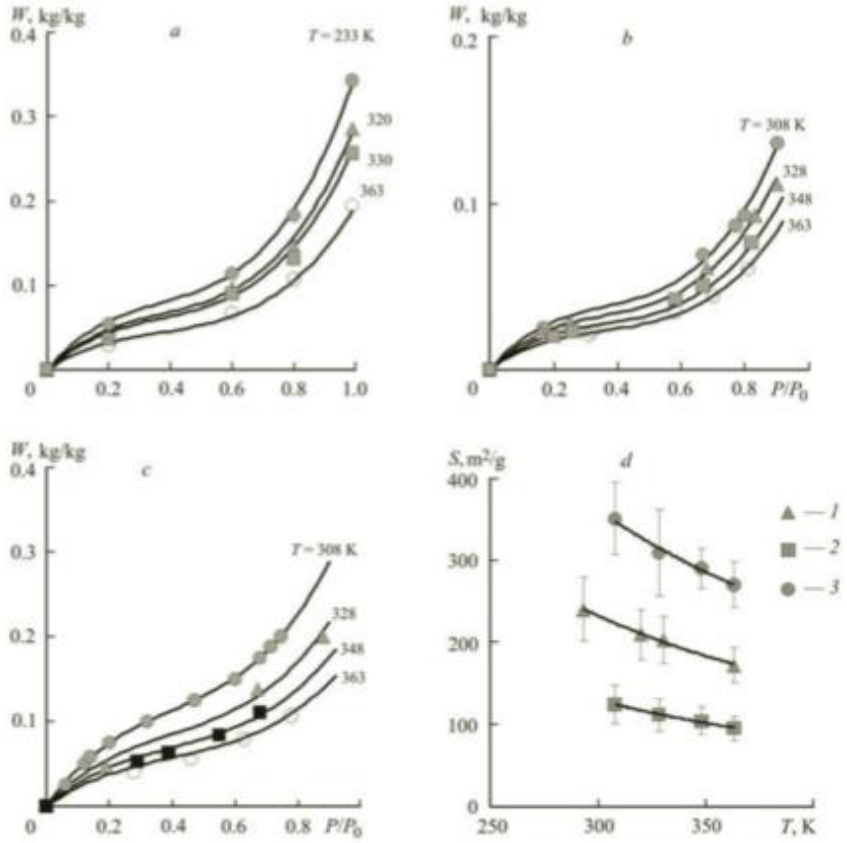


Fig. 3. Isotherms of sorption of water vapor by a wood (a), a clay (b), and a brown coal (c) at different temperatures in accordance with the polynomial model [15] and temperature dependence of the effective specific area of the wood (1), the clay (2), and the brown coal calculated by the exponential dependence (6) (d): a) $S = 1.55 \cdot 10^4 \cdot T^{-1.54}$, $R^2 = 0.996$; b) $0.93 \cdot 10^4 \cdot T^{-1.54}$, 0.988; c) $2.21 \cdot 10^4 \cdot T^{-1.53}$, 0.986.

change in the parameter b of model (2) (Fig. 5), expression (5) can be rearranged into a simple model suitable for estimating the dispersivity of soils, grounds, and other dispersion media:

$$S_{sa} = \frac{1}{b\rho r}, \quad r = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi N_A \rho}} = 1.93 \cdot 10^{-10} \text{ m}. \tag{7}$$

Unlike the water-vapor sorption isotherms of a material, its wedge-pressure isotherms are invariant with respect to the temperature of the material in accordance with the Polanyi theory [22, 26] and Eq. (1). Therefore, in the case where the specific area of a material is determined by the slope of its wedge-pressure isotherms, there is no need to standardize the temperature conditions, which advantageously differentiates the method proposed for estimating the parameter S from the BET method used traditionally in such calculations. If the wedge-pressure isotherms of a material are constructed in the usual (for hydrophysics of soils and grounds) coordinates of the thermodynamic moisture potential of the material (or its logarithm), the moisture content of the material is determined not as a mass fraction of moisture in it but as a percentage of

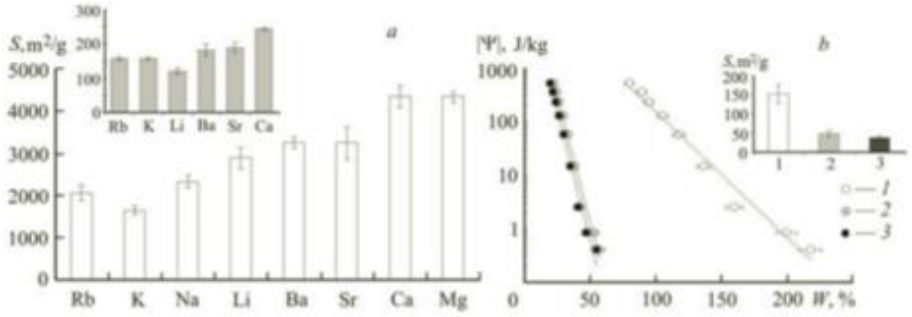


Fig. 4. Influence of the charge of the cations (a) and the concentration of the pore fluid (b) in finely dispersed systems on their specific area and water retentivity: a) montmorillonite (main figure) and kaolinite (insert) [24]; b) boracic sludges [11]; 1) distilled water; 2) 0.1 M NaCl; 3) 1 M NaCl.

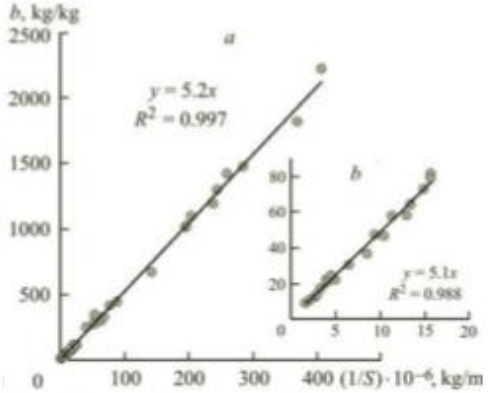


Fig. 5. Dependence of the parameter b of a material on its effective specific area: a) experimental data for all the samples (n = 48); b) finely dispersed samples with $64 \le S_{BET} \le 610$ m^2/g (n = 19).

moisture in the material to the mass of its solid phase, and the slope b of the wedge-pressure isotherms of the material has the dimensionality 1/%, then, in view of the numerical values of the parameters involved in (5), the formula for the standard specific area of the material will take the form

$$S_{st} = 51933/b \,. \qquad (8)$$

In Table 1, the values of S_{st} calculated by this formula for different materials are compared with those estimated by the BET method. Formula (8) is consistent with the above supposition that the minimum distance between the particles in a colloidal system is equal to the radius of a water molecule estimated geometrically at $1.93 \cdot 10^{-10}$ m.

We now direct our attention to the energy characteristics of the interphase interactions in a disperse system, involved in the model proposed. The ratio a/b in Eq. (2), evidently, represents the total water-retention energy E of the solid phase in such a system, determined as the integral of the thermodynamic moisture potential of the system with respect to its moisture content [4]. Theoretically, this quantity is equal to the product of the specific surface energy of a disperse system (the surface tension at the interface $\sigma_{s/liq}$) into its effective specific area: $E = a/b = \sigma_{s/liq} S$. Using this expression in combination with (7),

TABLE 1. Dispersivity of Colloid-Bonded Disperse Systems and Characteristics of the Interfacial Interactions in Them

No.	S_{BET}, m^2/g	$\ln a$, J/kg	b, kg/kg	R^2	s	S_{it}, m^2/g	A_H, J
1	610.0	9.67 ± 0.29	8.53 ± 0.43	0.985	0.19	608.9	–
2	373.2	13.73 ± 0.05	12.07 ± 0.47	0.993	0.06	430.3	$4.9 \cdot 10^{-19}$
3	302.1	14.05 ± 0.66	17.09 ± 0.70	0.992	0.06	303.9	$6.8 \cdot 10^{-19}$
4	472.4	13.85 ± 0.10	10.30 ± 0.81	0.989	0.12	504.2	$5.6 \cdot 10^{-19}$
5	350.6	13.24 ± 0.03	13.45 ± 0.26	0.997	0.05	386.1	$3.0 \cdot 10^{-19}$
6	250.0	13.06 ± 0.11	20.25 ± 1.34	0.991	0.06	256.4	$2.5 \cdot 10^{-19}$
7	222.7	13.01 ± 0.10	24.64 ± 1.35	0.994	0.07	210.8	$2.4 \cdot 10^{-19}$
8	250.0	14.40 ± 0.06	22.10 ± 0.34	0.999	0.06	235.0	$9.6 \cdot 10^{-19}$
9	200.4	13.52 ± 0.02	21.61 ± 0.73	0.997	0.02	240.3	$4.0 \cdot 10^{-19}$
10	153.0	13.19 ± 0.05	30.36 ± 0.59	0.997	0.08	171.1	$2.9 \cdot 10^{-19}$
11	117.9	13.61 ± 0.03	36.57 ± 1.18	0.995	0.04	142.0	$4.4 \cdot 10^{-19}$
12	95.7	13.61 ± 0.03	46.56 ± 1.57	0.994	0.04	111.5	$4.4 \cdot 10^{-19}$
13	49.7	13.68 ± 0.04	89.31 ± 3.56	0.992	0.05	58.1	$4.7 \cdot 10^{-19}$
14	64.1	13.66 ± 0.03	68.13 ± 2.10	0.996	0.02	76.2	$4.6 \cdot 10^{-19}$
15	40.1	13.70 ± 0.03	112.54 ± 3.63	0.995	0.04	46.1	$4.8 \cdot 10^{-19}$
16	88.5	13.87 ± 0.03	58.9 ± 0.4	1.000	0.02	106.2	$5.4 \cdot 10^{-19}$
17	106.2	13.82 ± 0.09	48.9 ± 1.2	0.998	0.08	109.5	$6.9 \cdot 10^{-19}$
18	67.2	14.29 ± 0.14	110.4 ± 4.0	0.994	0.12	88.2	$5.7 \cdot 10^{-19}$
19	77.2	13.60 ± 0.12	58.3 ± 2.1	0.993	0.12	89.0	$4.4 \cdot 10^{-19}$
20	41.3	13.82 ± 0.09	48.9 ± 1.2	0.998	0.08	47.7	$6.1 \cdot 10^{-19}$
21	48.2	13.93 ± 0.12	108.8 ± 3.6	0.995	0.11	47.0	$8.7 \cdot 10^{-19}$
22	15.8	14.34 ± 0.08	294.7 ± 6.3	0.998	0.07	17.6	$9.1 \cdot 10^{-19}$
23	18.3	13.97 ± 0.17	295.3 ± 13.6	0.989	0.15	17.6	$6.3 \cdot 10^{-19}$
24	14.6	13.71 ± 0.04	323.23 ± 15.52	0.998	0.04	16.1	$4.8 \cdot 10^{-19}$
25	19.1	13.73 ± 0.10	268.64 ± 10.33	0.994	0.05	19.3	$4.9 \cdot 10^{-19}$
26	5.1	13.48 ± 0.19	1026.2 ± 75.77	0.980	0.13	5.1	$4.4 \cdot 10^{-19}$
27	7.0	13.56 ± 0.04	671.30 ± 17.30	0.997	0.04	7.7	$4.2 \cdot 10^{-19}$
28	4.2	13.55 ± 0.03	1193.80 ± 12.84	0.999	0.04	4.4	$4.1 \cdot 10^{-19}$
29	3.5	13.50 ± 0.06	1473.80 ± 28.04	0.997	0.04	3.5	$3.9 \cdot 10^{-19}$
30	2.7	13.58 ± 0.11	1816.90 ± 61.78	0.992	0.15	2.9	$4.3 \cdot 10^{-19}$

one can estimate the value of $\sigma_{s/liq}$ and, by it, the generalized Hamaker constant for the molecular interactions in a material: $A_H = 24\pi r^2 \sigma_{s/liq}$ [26]. The resultant equation for estimating A_H has the form

$$A = 24\pi r^2 a \rho^3. \quad (9)$$

As is seen, this equation is independent of the specific area of the material and is determined by only the parameter a in model (1). The generalized Hamaker constants of the materials presented in Table 1 were estimated by (9) using the effective radius of a water molecule $r = 1.93 \cdot 10^{-10}$ m, and they have values of the order of 10^{-19} J, which is characteristic of lyophobic

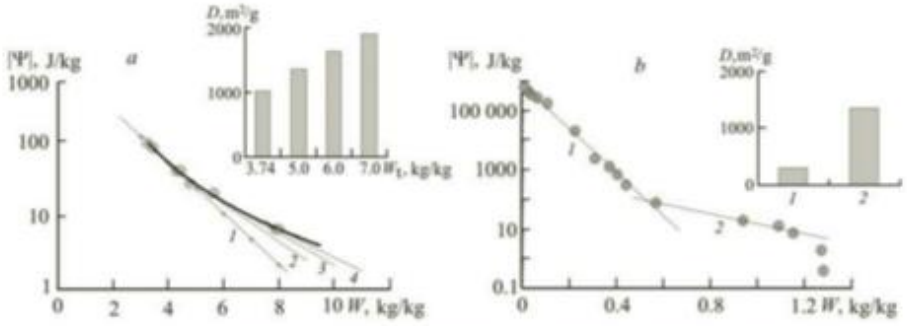


Fig. 6. Thermodynamic estimation of the change in the water retentivity and dispersivity of a Na-bentonite (a) and a dispersed valley peat (b) depending on their moisture: a) the points represent experimental data, the curve represents an approximation of the experimental data by the exponential dependence $\Psi = 3035.9W^{-2.9469}$ ($R^2 = 0.996$), and the straight lines represent the tangents to the indicated dependence at the points W_t = 3.74 (1), 5 (2), 6 (3), and 7 kg/kg (4); b) the points represent experimental data and the lines represent approximations of the experimental data corresponding to the dynamic-dispersivity regions 1 and 2 in the material by the exponential dependences $\Psi = 782561 \exp(-16.893W)$ ($R^2 = 0.993$) and $\Psi = 713 \exp(-3.860W)$ ($R^2 = 0.983$).

disperse systems with molecular interactions through the equilibrium liquid interlayers in them, corresponding to the primary (near) minimum of their interaction potential [26]. The same conclusion was made earlier for soils and colloid materials [30] on the basis of estimation of the Hamaker constants of colloid-bounded disperse systems by their water-vapor sorption isotherms and strength curves with the use of the fundamental Griffiths equation.

We emphasize once again that the effective specific area of a disperse system is not a constant value and is determined in many respects by the dynamic factors of the aggregative stability of its colloidal complex. Therefore, the quantitative estimation of the natural dynamics of the dispersivity of colloidal systems with a variable moisture content in their moistening–dehydration cycles should be the subject of further investigations and methodical developments in this field of knowledge. In particular, from the basic formulas (5) and (7) follows the simple proportion

$$S\frac{\lambda}{r} = S_{sl}\frac{b_{sl}}{b}, \quad (10)$$

where b_{sl} is the initial slope of the water-retention curve of the sorption region in a material. Let us call the quantity $S\lambda/r$ the dynamic-dispersivity coefficient D of a colloidal system. This coefficient characterizes the variability of the interface in a disperse system depending on the stability of its colloidal particles (the change in the size of their EDL), and it can be estimated, in accordance with (10), by the slope of the water-retention curves (or the tangent to them) constructed in semilogarithmic coordinates for the other regions of the system where the ionic-electrostatic mechanism of water retention is acted upon by the macrocapillary gravitational forces and other factors capable to disturb the stability of the moisture films in the system. A deviation of the water-retention curves of a disperse system up from the initial line $\ln|\Psi| = \ln a - b_{sl}W$ or a decrease in the parameter b with increase in the content of moisture in the system can, in accordance with (10), mean that the system in the moist state had a high dispersivity that then decreased with dehydration of the system and partial coagulation of its colloidal particles. The dispersivity of two-phase systems in which the solid phase consists mainly of colloidal particles (fine-grained clay grounds and minerals saturated with alkaline cations, highly swollen natural and synthetic polymers) can remain unchanged or increase directly with the moisture constant of a system throughout its moisture range until the system reaches its maximum swelling, which signifies that the system remains at the state where its particles are stable and separated by the powerful ionic-electrostatic barrier.

As an example, Fig. 6a presents classical Mattson data on the swelling pressure of a Na-bentonite depending on its moisture content [4, 14] and an approximation of these data by the exponential Campbell model [6] with tangents to the

exponential dependence, whose angle of inclination is inversely related to the dynamic dispersivity factor D of the material in accordance with (10). Exponential dependences of the water retention of a material on its moisture content of the form $|\Psi| = mW^{-n}$ or, on a semilogarithmic scale, $y = \ln|\Psi| = \ln m - n \ln W$, where n and $\ln m$ are empirical constants, are used widely in hydrophysics [3, 6, 17]. Since the equation for the tangent to these dependences at the point $W = W_t$ has the form $y = f - bW$, where $f = n + \ln m - n \ln W_t$ and $b = n/W_t$, substituting the parameter b into (10), we obtain the expression $D = S_{t}b_{t}W/n$, in accordance with which the dynamic dispersivity of a material is proportional to its moisture content. The initial effective specific area of the Na-bentonite was estimated at $S_{t} = 1015$ m^2/g with a confidence factor $R^2 = 0.991$ by the slope $b_{t} = 0.7875$ of the exponential function $|\Psi| = 1219.3 \exp(-0.7875W)$, approximating well the five upper experimental points (the straight line with crosses) in Fig. 6a, with the use of the basic formula (5) for $\lambda = 1.25$ nm ($C_0 = 60$ mole/m^3). Figure 6b illustrates the dynamics of the dispersivity and water retentivity of an organic colloid (sample 8 dispersed in a colloidal mill) in the process of dehydration and coagulation of its particles. Here, two portions of the water-retention curve, corresponding to the state of the material after the threshold of the mass coagulation (aggregation) of particles in it is attained and its state before the attainment of this threshold, are distinctly separated. As is seen from the inset in this figure, the values of the dynamic dispersivity of the material, corresponding to these potions, differ by more than four times.

In conclusion we emphasize once again that the effective specific area of a colloidal system has no a constant value and depends in many respects on the dynamic factors of the aggregative stability of its colloidal complex, which points to the fact that there exists a natural dynamics of the dispersivity of systems with a variable moisture content in their hydration–dehydration cycles, and the quantitative estimation of this dynamics should be a subject of further investigations in this field of knowledge.

Conclusions. The water retentivity and dispersivity of colloidal systems are determined by the competitive interactions of their solid-phase particles with each other and with the liquid phase in them. The finely dispersed particles stabilized by the ionic-electrostatic barrier in such a system possess a high dispersivity and a high excess surface energy which is expended for the retention of water in the system. In the case where this barrier is broken down in a disperse system, its solid-phase particles come in contact with each other (coagulate), with the result that the dispersivity and surface energy of the system and, consequently, its water retentivity decrease. Therefore, the dispersivity and water retentivity of a colloidal system are determined not only by the properties of the solid phase of the system but also by the properties of its liquid phase, on the composition and concentration of whose components the aggregative stability of the particles in the system depends. In the stability range of a disperse system, determined by the linear portion of its wedge-pressure isotherms constructed in the semilogarithmic coordinates, the forces of electrostatic repulsion of particles arising in the case where they approach each other with a partial overlap of their electric double layers, dominate over the molecular forces of attraction of particles, which gives rise to the wedge-pressure effect realized with absorption of moisture by the system in accordance with the Deryagin model.

It is shown that the wedge-pressure isotherms of many natural and artificial colloidal systems (soils, grounds, clay minerals, wood, caustobioliths, synthetic polymeric hydrogels) agree well with the fundamental Deryagin model ($R^2 = 0.980$–0.999, $s = 0.02$–0.19) in a wide range of change in their moisture potential. The ionic-electrostatic model of such a system allows one to estimate its dispersivity (specific area) and the energy factors of the interphase interactions in it (its interphase surface tension and generalized Hamaker constants). The specific area of the materials with a dispersivity of 3–610 m^2/g, determined by the method proposed, was close to that obtained using the traditional BET method, but the new method differs advantageously from the BET method by its temperature invariance. In the general case, the dynamic factor of the dispersivity of a colloidal system decreases with increase in the temperature of the system and changes depending on the stability factors of its colloidal complex (the surface charge of the system and the concentration of electrolytes in its pore fluid). It was proposed to determine the dispersivity of such a system by the tangents to the curve of its water retentivity constructed by an exponential hydrophysical model. It was established with the use of this method that the dispersivity of a colloidal system increases in proportion to its moisture content.

Acknowledgment. This work was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 19-29-05006).

NOTATION

a, physically substantiated parameter characterizing the form and potential (charge) of a surface, J/kg; b, physically substantiated parameter determined by the dispersivity of a system and the properties of its EDL, kg/kg; C_0, molar concentration of ions in the pore fluid of the system, mole/m^3; D, dispersivity of the system; F, Faraday number, C/mole;

h, thickness of a water film, m; M, molar mass of water, kg/mole; N_A, Avogadro number, 1/mole; R^2 and s, confidence factor and standard approximation error; S, effective specific area, m^2/kg; T, absolute temperature, K; W, mass fraction of moisture; λ, effective thickness of the EDL, m; ρ, density of water, kg/m^3; ξ, electric constant, F/m; ξ_0, relative permeability of water; Ψ, thermodynamic potential. Subscripts: liq, liquid; t, touch; cr, critical; ar, arable; st, standard; s, solid; m, monolayer.

REFERENCES

1. A. M. Globus (Ed.), *Thermodynamics of Soil Moisture* [in Russian], Gidrometeoizdat, Leningrad (1966).
2. S. V. Nerpin and A. F. Chudnovskii, *Physics of Soils* [in Russian], Nauka, Moscow (1967).
3. A. D. Voronin, *Structural-Functional Hydrophysics of Soils* [in Russian], Izd. Moskovsk. Univ., Moscow (1984).
4. A. V. Smagin, Theory and methods of evaluating the physical status of soils, *Eurasian Soil Sci.*, **36**, No. 3, 301–312 (2003).
5. A. R. Dexter, Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth, *Geoderma*, **120**, 201–214 (2004).
6. G. S. Campbell, *Soil Physics with BASIC*, Elsevier Sci., New York (1985).
7. J. Šimůnek, M. Th. van Genuchten, and M. Šejna, *The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*, PC Progress, Prague (2006).
8. V. T. Trofimov (Ed.), *Pedology* [in Russian], Izd. Moskovsk. Univ., Moscow (2005).
9. M. G. Khuamchenkov, Mathematical modeling of rheophysical properties of clays and clay rocks, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **76**, No. 3, 659–666 (2003).
10. M. G. Khuamchenkov and A. N. Chekalin, Mathematical modeling of dispersion of argillaceous minerals in mudded oil reservoir beds, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **76**, No. 5, 1001–1007 (2003).
11. A. V. Smagin, I. N. Kol'tsov, I. L. Pepelov, A. V. Kirichenko, N. B. Sadovnikova, and R. R. Kirzhaev, The physical state of finely dispersed soil-like systems, *Eurasian Soil Sci.*, **44**, No. 2, 163–172 (2011); DOI: 10.1134/S1064229311020128.
12. B. V. Deryagin, N. V. Churaev, and V. M. Muller, *Surface Forces* [in Russian], Nauka, Moscow (1987).
13. B. V. Deryagin and N. V. Churaev, *Water in Disperse Systems* [in Russian], Khimiya, Moscow (1989).
14. I. I. Sudnitsyn, A. V. Smagin, and A. P. Shvarov, The theory of Maxwell–Boltzmann–Helmholtz–Gouy about the double electric layer in disperse systems and its application to soil science, *Eurasian Soil Sci.*, **45**, No. 4, 452–457 (2012); DOI: 10.1134/S106422931204014X.
15. S. J. Gregg and K. S. W. Sing, *Adsorption, Specific Area, and Porosity* [Russian translation], Mir, Moscow (1984).
16. A. V. Smagin, Thermodynamic evaluation of the impact of strongly swelling polymer hydrogels with ionic silver on the water retention capacity of sandy substrate, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **52**, ID No. 012087 (2017); DOI: 10.1088/1755-1315/52/1/012087.
17. E. V. Shein and L. O. Karpachevskii (Eds.), *Theories and Methods of Soil Physics* [in Russian], Grif i K, Moscow (2007).
18. A. V. Smagin and G. V. Smirnov, Use of gas-chromatography to determine the sorption isotherms of water-vapor in soil, *Eurasian Soil Sci.*, **24**, No. 2, 119–124 (1991).
19. A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, M. V. Glagolev, and A. V. Kirichenko, New instrumental methods and portable electronic means for ecological control of the state of soils and neighboring media, *Ekol. Vestn. Sev. Kavkaza*, **2**, No. 1, 5–17 (2006).
20. A. V. Luikov, *Theory of Drying* [in Russian], Gos. Ekonom. Inst., Moscow–Leningrad (1950).
21. S. I. Dolgov, A. A. Zhitkova, and G. B. Vinogradova, Hydrosorption hysteresis of soils, in: *Physics, Chemistry, Biology, and Mineralogy of Soils* [in Russian], Nauka, Moscow (1964), p. 62.
22. A. V. Smagin, Thermogravimetric determination of specific surface area for soil colloids, *Colloid J.*, **78**, No. 3, 391–396 (2016); DOI: 10.1134/S1061933X16030170.
23. G. N. Fedotov, G. V. Dobrovol'skii, and S. A. Shoba, On the mechanism of nanostructurization of soil gels, *Dokl. Ross. Akad. Nauk*, **445**, No. 4, 482–485 (2012).
24. A. A. Rode, *Selected Works*, Vol. 3, *Basic Theory on Soil Moisture* [in Russian], V. V. Dokuchaev Pochv. Inst., Moscow (2008).
25. G. N. Fedotov, E. V. Shein, V. I. Putlyaev, T. A. Arkhangel'skaya, A. V. Eliseev, and E. Yu. Milanovskii, Physicochemical bases of the differences between the sedimentometric and laser-diffraction methods of determining the granulometric composition of soils, *Pochvovedenie*, No. 3, 310–317 (2007).

26. E. D. Shchukin, A. V. Pertsov, and E. A. Amelina, *Colloidal Chemistry* [in Russian], Izd. Moskovsk. Univ., Moscow (1982).
27. I. I. Sudnitsyn, *Movement of Soil Moisture and Consumption of Water by Plants* [in Russian], Izd. Moskovsk. Univ., Moscow (1979).
28. Yu. V. Egorov, I. I. Sudnitsyn, and A. V. Kirichenko, Prospects of use of the Landau–Deryagin law for estimating the degree of degradation of soils as a result of their contamination with chlorides, *Vestn. Moskovsk. Univ., Ser. Pochvovedenie*, No. 4, 33–39 (2016).
29. A. M. Globus, *Soil-Hydrophysical Support of Agroecological Mathematical Models* [in Russian], Gidrometeoizdat, Leningrad (1987).
30. A. V. Smagin, Experimental estimation of the energy parameters of molecular interactions in soils, *Colloid J.*, **70**, No. 4, 473–477 (2008); DOI: 10.1134/S1061933X0804011X.

materials

MDPI

Article

Biodegradation of Some Organic Materials in Soils and Soil Constructions: Experiments, Modeling and Prevention

Andrey V. Smagin [1,2,3,*], Nadezhda B. Sadovnikova [1,2], Vyacheslav I. Vasenev [2,3] and Marina V. Smagina [2]

1 Soil Science Department, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia; nsadovnik@rambler.ru
2 Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences (ILAN), 21, Sovetskaya, Uspenskoe, Moscow 143030, Russia; vasenyov@mail.ru (V.I.V.); msmag08@mail.ru (M.V.S.)
3 Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, Agrarian-technological Institute, Peoples' Friendship University of Russia, Miklukho-Maklaya St., 6, Moscow 117198, Russia
* Correspondence: smagin@list.ru

Received: 22 June 2018; Accepted: 27 September 2018; Published: 2 October 2018

Abstract: The decomposition of natural and synthetic polymeric materials (peat, humates, biochar, strongly swelling hydrogels and other soil conditioners) in a biologically and chemically active soil environment inevitably leads to a reduced ability to improve the structure, water-retention, absorptive capacity and fertility of artificial soil constructions in urbanized ecosystems and agro landscapes (constructozems). Quantitative assessment of the biodegradation process using field and laboratory incubation experiments, as well as mathematical modeling, showed the possibility of significant (up to 30–50% per year) losses of organic matter of constructozems and a corresponding deterioration of soil quality. Incubation experiments that track the carbon dioxide emission rates of polymeric materials under given thermodynamic conditions allow for the estimation of decomposition rates in addition to an exploration on the dependence of such rates on additions of microbial inhibitors. The use of nomographs provide an opportunity to optimize long-term amendment performance in soil constructions by identifying the most favorable depths to apply amendments to ensure stable functioning during desired in-service timelines in the built environment. The results of the study are useful for geo-engineers and landscaping practitioners.

Keywords: biodestruction; soil constructions; sustainability; polymers; synthetic hydrogels; peat; CO_2 emission; water-retention; modeling

1. Introduction

The synthesis and decomposition of organic matter significantly influences the formation and functioning of soils. Anthropogenic perturbations to these processes arising in agro-ecosystems, urban, and military landscapes (SUITMA's), commonly leads to soil degradation, deterioration of physical, chemical and biological properties, loss of fertility and other environmental functions [1–3]. The lack of organic substances in such soils must necessarily be compensated by applying soil conditioners that may be of either organic or synthetic manufacture. It is important to evaluate not only the effect of organic materials on soil properties, but also their stability or characteristic residence time in a biologically and chemically active soil environment [4,5].

In the first (linear) approximation, the following model for the destruction of organic matter with a concentration (inventory) (C, kg/m^2) and a flux (input) on the surface (L, kg·m^{-2}·year^{-1}) can be used for this purpose [6,7].

$$\frac{dC}{dt} = L - kC, \quad (1)$$

where t is the time, k, year^{-1} is the mineralization (biodegradation) constant associated with the half-life of the substance:

$$T_{0.5} = \ln 2/k, \quad (2)$$

and with a 95% decay period:

$$T_{0.95} \approx 3/k. \quad (3)$$

The model (1) and expressions like (2) and (3), which follow from it, underlie the estimation of the characteristic times of soil organic matter turnover. Raich and Schlesinger [8] estimated a turnover time for organic carbon in soils that ranged from 10 years in tropical grasslands to 500 years for tundra and wetland environments, with a global average of 32 years. According to [9], the average turnover time of 75% of the organic matter of tropical forest soils does not exceed 30 years with a total carbon stock of 14–27% of the global soil reservoir. In the review [10], the average time of carbon turnover in the soil cover of the planet is estimated at only 20–22 years. The radiocarbon dating of humus from the upper 10 cm of the thickness of the zonal series of Eurasian soils from the red soil of moist subtropics (Cambisols Chromic) to the arctic tundra soil (Cryosol Haplic) gives characteristic times of organic matter formation in 60–350 years [11]. In experiments on the peat mineralization of various bog ecosystems from the tropics to northern latitudes, the characteristic time of 95% organic matter decomposition (T_{95}) was 50–250 years, and the half-life was $5 < T_{50} < 50$ years [12,13]. The value of the litter-and-fall coefficient (L/C), which estimates the turn-up time of detrital carbon in the first approximation, according to model (1) varies from 0.2 to 25 years, and the T_{95} index from 1.3 to 60 years [6,14,15]. Thus, the dominant part of the organic matter of the upper (fertile) soil layers is deposited there for a rather short period. Only removed from the surface or buried organic substrates can persist for centuries and even millennia, as shown by the radiocarbon dating of individual fractions of soil humus [3,11]. At the surface of the soil in the zone of the maximum biological and biochemical activity, the decomposition of carbon stocks including humic substances, peat, lignin, and biochar, takes place at a relatively rapid pace, which is probably promoted by the priming effect [16–19].

These natural patterns of dynamics and stability of organic substances in soils should be taken into account in calculations of doses of organic fertilizers and soil conditioners, as well as in the design of soil constructions in anthropogenic ecosystems. First of all, we must understand that if there are absolutely no stable organic substances, artificial soils (constructozems) cannot be expected to perform their intended tasks in-perpetuity. However, two strategies are commonly used to prolong the life span of the fertile layer of soils with organic conditioners. The first way is to reduce the susceptibility of soil conditioners to biodegradation by including in their composition substances that inhibit biological activity. Such a method, from our point of view, is particularly effective for synthetic polymer hydrogels, which can simultaneously be used to control pathogenic microflora in urban and agricultural soils. The suppression of pathogenic microorganisms in the rhizosphere is possible through the creation of local gel structures with modern plant protection products, for example, based on silver ions or nanoparticles [20]. Unlike aqueous solutions and suspensions, gel structures are firmly fixed in the root zone, thus preventing vertical migration of water and removal of water-soluble substances, including plant protection agents [4,21]. For toxic agents, this means a decrease of the ecological risk of contamination of the adjacent environments (i.e., soil and groundwater). Given resistance to degradation and seasonal persistence in the root zone, hydrogels retain their ability to improve the water-retaining and absorbing capacity of soils. Their use in soil engineering allows extending a period of steady water consumption (without reduction of transpiration) of plants in drought conditions for 2–3 weeks or to achieve 1.5–2-fold water savings during crop irrigation [4,21].

The second way of preserving organic substances consists in their removal from the surface zone with the maximum biological and biochemical activity [4,21]. Microbiological activity usually decreases exponentially with the depth of the soil, which is apparently due to a similar pattern of distribution of root systems, carbon substrates and oxygen, limiting the functioning of aerobic microflora [2,22]. This circumstance theoretically gives the opportunity to determine the optimum depth of localization of organic conditioners in the soil, which guarantees their stability for a given service life [4].

The main objective of the study was to quantify and simulate the biodegradation of the most effective soil conditioners for urban landscaping and irrigated agriculture in the form of natural (peat) and synthetic (polymer hydrogels) organic materials. Specific tasks included:

- Determination of the rate of destruction of peat in laboratory incubation experiments, depending on the control factors of temperature and humidity, and mathematical modeling of their effects;
- Quantitative evaluation of biodegradation of different types of strongly swelling polymer hydrogels in laboratory incubation experiments under the influence of inhibitors of biological activity based on ions and silver nanoparticles;
- Quantitative assessment of the effect of soil conditioners and their biodegradation on the physical state and water-retaining capacity of soils;
- Determination of the intensity of destruction of biopolymer materials in the field;
- Determination of the dependence of biological activity of soils on depth, justification and verification of the nomographs method for estimating the reduction of biodegradation of soil conditioners at a given depth of soil.

2. Materials and Methods

Natural soils (Albeluvisols Umbric, Arenosols) and special soil constructions (urban constructozems) were investigated in humid climatic conditions on the territory of the Moscow megapolis (western administrative district), at the Experimental Station of the Moscow State University "Chashnikovo" and in the arid zone at the Experimental Station of Qatar Ministry of Municipal and Agricultural Affairs near Doha. Soil samples were taken from different depths within 1 m of soil by special soil auger for simultaneous determination of water content ($W_{\%}$) and soil bulk density (ρ_b, g·cm^{-3}):

$$W_{\%} = 100\frac{m_w - m_s}{m_s} \quad (4)$$

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} \quad (5)$$

where m_w, m_s and g are the masses of the sample before and after drying at 105 °C, V_t, cm^3 is the volume of soil auger. In addition to soil samples in some experiments, calcined quartz sand was used as a model soil substrate devoid of organic matter.

As soil conditioners, peat samples from various deposits (Tver, Moscow, Tomsk regions of Russia) before and after mechanical dispersion, as well as strongly swelling polymer hydrogels (SSPH) were tested. The hydrogel compositions were prepared on the basis of 5 types of strongly swelling polymers: №1—acryl hydrophilic Aquasorb preparation (France) with high degree of swelling (HDS) in pure water (700–1000 gH_2O/g); №2—radiation-cross-linked technical polyacrylamide, synthesized in Institute of Chemical Physics of the Russian Academy of Science, with HDS in pure water 700–1000 g/g, and in saline solutions of 0.01–0.1n concentration at least 250–500 g/g; an experimental batch of acrylic gels with HDS in pure water 500–700 g/g from the Ural Chemical Company, prepared using proprietary technology [23] that included samples №3—with hydrophilic filler in the form of waste biocatalytic production of polyacrylamide, №4—with amphiphilic excipient in the form of humates, and the addition of microelements, №5—with amphiphilic excipient in the form of dispersed peat.

Silver, as an inhibitor of biological activity, and as a component of protective gel compositions in the form of nanoparticles (experienced "Zeroxxe" of AgroChimProm GC (http://tdahp.ru/en/) with

amphiphilic surfactant-stabilizers [24] and in the form of ionic (chemically pure $AgNO_3$) solution were added to SSPH in the concentration (for the active substance, Ag) 10, 100, 1000 ppm per mass of water in swollen hydrogel. Variants of the experiments with silver inhibitors included pure gel compositions, and their mixtures with water extracts of rotting potato tubers and calcined to 500 °C sandy substrate.

The main method of laboratory testing was incubation of samples in closed vials with subsequent assessment of soil respiration by CO_2 emission. The index of specific or so-called basal respiration, obtained in incubation experiments, is often used to assess the activity of the microbial community of soils, including in urban settings [2,25,26]. However, despite the standardization of the definition of this indicator [27], a number of researchers indicate serious methodological problems not solved in this standard [2,25]. Therefore, in the following we describe the modified method for determining soil respiration according [2], which was used in our study. In closed vials of dark glass or plastic with soil samples, proper conditions were created for the development of microorganisms and biodegradation of organic substrates. For this purpose, the previously calculated amount of water was added to air-dry soil samples and their compositions with soil conditioners to obtain optimum moisture content 0.7–0.8 units from the total moisture capacity (W_s). This value was estimated by calculation from the data on soil bulk density (5) and the density of the solid phase (ρ_s, g/cm^3) by the formula:

$$W_s = \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \quad (6)$$

where ρ_w = 1.0 g·cm^{-3} is the density of water, ρ_s = 1.6 g·cm^{-3} for peat and ρ_s = 2.65 g·cm^{-3} for mineral soil substrates. In experiments with gel-silver compositions the humidity was determined according the degree of swelling of SSPH 100 g/g in pure gel compositions that in soil-gel mixes gives 1:1 ratio of water and mineral components.

Moist samples in tight-sealed flasks were places in a thermostat with the optimum temperature of incubation of 25–30 °C. The optimum humidification and temperature conditions corresponded to the highest or potential biological activity and biodegradation of organic substrates in a given soil sample. In separate experiments, biological activity (respiration) and biodegradation were investigated at different humidity levels ($0 < W \leq W_s$) and temperature ($4 \leq T \leq 30$ °C) simultaneously with the thermodynamic analysis of the water-retaining capacity of the soil by centrifugation [4,28] (see below). After the time interval of incubation (Δt = 20–26 h), changes in the contents of CO_2 ($\Delta X_{\%}$) compared to the initial (atmospheric) level were measured, and the soil respiration rate (U_m, mgCO_2·kg^{-1}·h^{-1}) was calculated per unit mass of the soil-substrate solid phase (m_s) using the following equation [2,4]:

$$U_m = \frac{PMV_g \Delta X_{\%}}{100RTm_s \Delta t} \quad (7)$$

where R is the universal gas constant (8.314 J·mole^{-1}·K^{-1}), T—absolute temperature, K, P—atmospheric pressure (Pa), M = 44 g·mole^{-1}—molar mass of CO_2, V_g, mL—volume of the gas phase in the flask.

The volumetric content of CO_2 in air samples from the flask was determined using a PGA-7 infrared gas analyzer (Electronstandart, Saint-Petersburg, Russia). The $\Delta X_{\%}$ value for CO_2 was estimated by the modified method [2,20] involving correction for the adsorption and dissolution of gas generated by microorganisms during incubation. In this method, after the end of incubation, flasks were placed in a microwave oven ME83XR (Samsung Electronics Port Klang, Malaysia) for 3 min for degassing of soil solution and thermo-desorption of CO_2 from the surface of soil particles by heating to 70–80 °C.

The content of organic carbon ($C_{\%}$) in the samples was determined by coulometric titration using the AN-7529 analyzer (Gomel Plant of Measuring Devices Gomel, Russia). Calculation of biodestruction constant (k, year^{-1}) from the data of the CO_2 emission (U_m, mgCO_2·kg^{-1}·h^{-1}) and

percentage carbon content ($C\%$) in soil conditioners was carried out according to the linear model of organic matter biodegradation (1) in the form of the following ratio [20]:

$$k = \frac{T_b}{T_0}\left(\ln 100 - \ln\left(100 - 24 \cdot 10^{-2}\frac{12U_m}{44C_\%}\right)\right) \quad (8)$$

where $T_0 = 1$ is the time scale for the process of biodegradation in years, 12/44 is the ratio of the molar masses of carbon and CO_2, 24×10^{-2} is the conversion factor from hours to days, from milligrams to kilograms and from % to kg/kg, T_b is the average yearly period of biological activity, expressed in days.

Thermodynamic analysis of water-retention capacity of soil samples and their compositions with soil conditioners was carried out by centrifugation method, with modifications [4,20], using a laboratory centrifuge CLS-3 in the range of water-retention energy (soil water potential or equivalent pressure) from 0 to 800–1000 J/kg (kPa). As a basic criterion, the water retention curve (WRC) or the dependence of the thermodynamic potential of water from its content in the soil is used. Approximation of experimental data of WRC has been performed by van-Genuhten [29] model.

Field experiments on the destruction of soil conditioners were conducted at Moscow in layered soil constructions based on peat soil-modifiers and hydrogels [4,21]. The decomposition of peat was determined in capsules from nylon fiber by decreasing the mass of peat samples dried at 95 °C for a certain period of time (t). The mass ratio before (m_0) and after the fixed stage of the experiment (m_t), characterized the biodegradation rate:

$$D_\% = 100m_t/m_0. \quad (9)$$

After completion of all successive stages of the experiment, the dependence of $D_\%$ on time was obtained. An estimate of the biodegradation constant (k) averaged over the entire period or the characteristic times ($T_{0.5}$ and T_{95}) of the biodegradation process, in accordance with (2) and (3), was obtained using the model (1). The destruction of SSPH was analyzed in the same way, only not by weight loss, but by reducing the content of organic carbon in capsules with calcined quartz sand mixed with hydrogel. Hydrothermic parameters were controlled in an automatic mode by programmable sensors "Hygrochron" DS1923 (Dallas Semiconductor, Dallas, TX, USA) and loggers Decagon (USA).

All experiments were carried out in 3–4 multiple repetitions with subsequent statistical and mathematical processing of data using standard functions of MS Excel and the nonlinear regression wizard of S-Plot 2001 software for mathematical modeling. Numerical modeling of biodegradation was carried out in the Matlab-7 software.

3. Results

3.1. The Study and Modeling of Peat Biodegradation

A quantitative assessment of the intensity of biodegradation (microbial respiration) in peat samples of different genesis reveals a nonlinear form of the dependence of these processes on the controlling factors—temperature (T, °C) and humidity (dimensionless index W/W_s, where W_s is the total moisture capacity). (Figure 1). The dependence is represented by a function with an extremum in the range 0.6–0.7 units of W/W_s and 25–30 °C of temperature. To describe the dependences obtained in the temperature range from zero to 30 °C and relative humidity ($0 < W/W_s \leq 1$), the following formulas are proposed [4]:

$$U_{(T)} = m_{(T)}U_{max};\ m_{(T)} = Q_{10}^{\frac{T-T_m}{10}} \quad (10)$$

where U_{max} is the maximum destruction intensity at the optimum, T_m is the optimum temperature (30 °C), Q_{10} is the temperature coefficient, which on the average can be taken equal to two;

$$U_{(W)} = f_{(W)}U_{max};\ f_{(W)} = \left(\frac{W}{W_m}\right)^a \left(\frac{1-W}{1-W_m}\right)^b \quad (11)$$

where $W_m = a/(a+b)$ is the water point of the extremum (U_{max}) on the curve of the $U_{(W)}$ dependence, a, b are empirical constants. Estimation of empirical parameters a and b from experimental data is carried out using the nonlinear regression software package in the S-Plot computer program (see examples in Figures 1–4). High coefficients of determination (R^2 = 0.96–0.99) at small standard approximation errors (s = 0.03–0.07) and statistically significant at level $p < 0.001$ the parameters a, b confirm the adequacy of the model. The relationship between the parameters a and b with the extremum point W_m simplifies the estimation of these values and makes the model actually two-parameters.

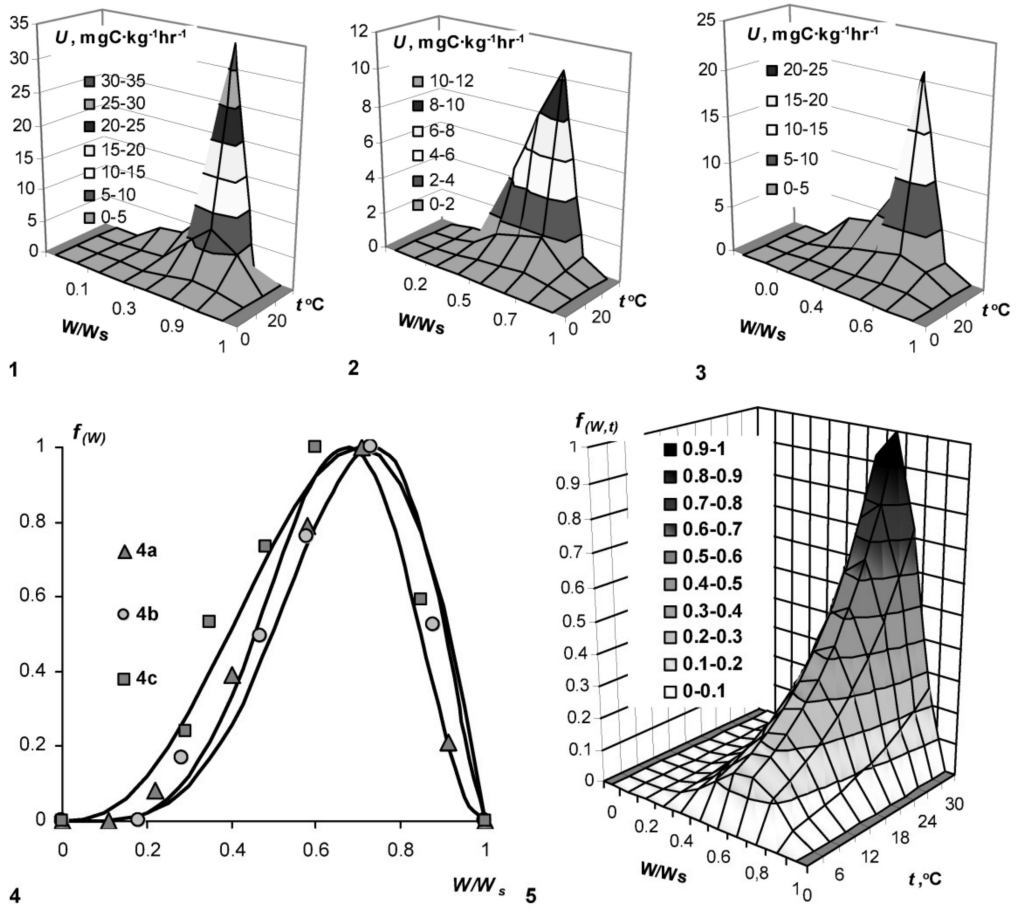


Figure 1. Quantification and modeling of decomposition rate of organogenic substrates (U) as a function of temperature (t) and relative humidity (W/W_s). 1—peat (10 cm), Tver region, 2—peat (100 cm), Tomsk region, 3—peat (10 cm), Moscow region; 4—model (11): 4a—peat (100 cm), 30 °C, Tver region, $f_{(W)} = (W/W_s/0.67)^{4.84}\{(1 - W/W_s)/(1 - 0.67)\}^{2.35}$; R^2 = 0.96, s = 0.07; 4b—peat (100 cm), 5 °C, Tomsk region, $f_{(W)} = (W/W_s/0.74)^{4.27}\{(1 - W/W_s)/(1 - 0.74)\}^{1.53}$; R^2 = 0.99, s = 0.03 4c—peat (10 cm), 20 °C, Moscow region, $f_{(W)} = (W/W_s/0.70)^{2.54}\{(1 - W/W_s)/(1 - 0.70)\}^{1.09}$; R^2 = 0.99, s = 0.04; 5—model (12), peat (100 cm), Tver region.

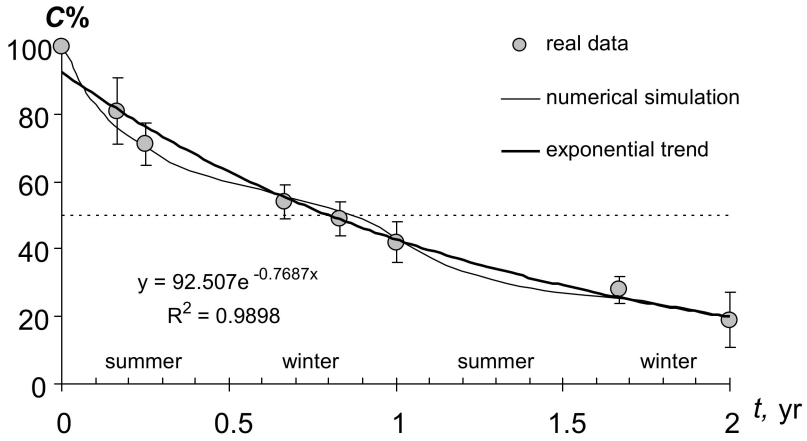


Figure 2. Biodegradation of peat (2-year experiment) on the surface of urban soil in the Moscow megacity.

Simulation of the total contribution of temperature and humidity to the process of destruction of organic substances and the release of gaseous carbon can be achieved using a combination of functions (10) and (11). In the simplest case, it is sufficient to multiply the factors of humidity $f_{(W)}$, temperature $m_{(T)}$ and the maximum value of the biodegradation rate (U_{max}) under optimum conditions ($T = T_m$, $W = W_m$), i.e.,

$$U = f_{(W)} \cdot m_{(T)} \cdot U_{max}. \quad (12)$$

An example of such a calculation is shown in Figures 1–5.

Analysis of the obtained quantitative patterns of biodegradation (Figure 1) shows that a relatively small decrease in humidity (up to 0.6–0.7 units from the total moisture capacity) leads to a sharp burst of biological activity and the destruction of organic matter of peat. This may be the reason for the disappearance of peatlands [1,16] during drainage melioration, as well as rapid biodegradation of urban green lawns on peat and peat-mineral soil substrates during their intensive irrigation. Under hydrothermic optimum conditions, organogenic materials can be removed up to 20–30 mgC/kg·h (Figure 1). With a typical content of organic carbon at 30–40% of the total detritus mass, calculation according to (8) gives an estimate of the peat biodegradation constants $k = 0.4$–0.9 year^{-1} at $T_b = 365$ days. That is, at the maximum possible rate of destruction under optimum conditions, the half-life of peat will be only $T_{0.5} = \ln 2/k = 0.8$–1.6 years, and 95% of peat will decompose during the time $T_{0.95} \approx 3/k = 3$–7 years.

In reality, the optimum conditions cannot exist in the soil for such a long time, and in the calculations it is necessary to use the period of biological activity $T_b < 365$ days, and also to take into account the dynamics of the controlling factors T and W. However, direct observations of peat destruction on the soil surface in urban conditions show that the real value of $k = 0.77$ year^{-1} is close to the upper border of the range obtained in the laboratory for the potential destruction $k = 0.4$–0.9 year^{-1} (Figure 2). This value was obtained by approximating the data of a two-year experiment on the decomposition of peat on the surface of constructozem in humid conditions in Moscow using the model (1). In accordance with the exponential model, especially large peat losses were observed in the first (summer) months of the experiment. At this time, destruction can reach 9–13% of organic matter per month. In winter, the process slows down somewhat, but does not stop completely. The loss of peat at this time is 3–4% of organic matter per month, and the total destruction during the cold season reaches 10–15% of organic matter or 20–25% of the total destruction in the first year of the experiment as a whole. A more correct description of peat biodegradation during the year is provided by the numerical model [4,5], implemented in the Matlab-7 program. In this model, the kinetic parameter of destruction (k) is not constant and depends on the controlling factors of temperature and humidity in accordance with (10) and (11): $k = k_{max} \cdot f_{(W)} \cdot m_{(T)}$. Known monitoring data on the annual

dynamics of the parameters T and W in the Moscow megapolis [4,26] are introduced into the model by spline-approximation [5]. The results of the numerical simulation are shown in Figure 2. They clearly reflect the increase in biological activity in the summer with a rise in temperature and a decline in the cold season.

In just first year, the peat substrate loses up to 50–60% of its mass (Figure 2). In the future, the process gradually slows down, in accordance with the model of biodegradation (1). The half-life and characteristic time of 95% organic matter decomposition, estimated by Equations (2) and (3) are 0.9 and 3.9 years respectively. Such a low stability of peat substrates actively used in the practice of gardening in Moscow, inevitably lead to degradation of vegetation, in particular green lawns [26]. Moreover, the destruction of unstable peat substrates leads to an additional release of carbon dioxide into the atmosphere and a general negative carbon balance of urban lawns [26], exacerbating the local greenhouse effect. The specific intensity of CO_2 emission from a unit of area during annual peat decomposition (200–500 $g \cdot m^{-2}$ $year^{-1}$) exceeds the analogous indicator of anthropogenic release (100 $g \cdot m^{-2} \cdot year^{-1}$ from the calculation of 100 thousand tons per year of exhaust gases in the area of Moscow about 100 thousand hectares). In order to compensate for this source, according to model (1), the net productivity (L) in the stationary state should be not less than 200 $g \cdot m^{-2} \cdot year^{-1}$, and the gross productivity of the lawn is not less than 400 $g \cdot m^{-2} \cdot year^{-1}$ of dry mass, taking into account a 50% loss of respiration, which is hardly achievable using conventional lawn grass mixtures.

3.2. The Study and Modeling of the Hydrogel's Biodegradation

The experimental results of strongly swelling polymer hydrogelsSSPHs biodegradation under the influence of silver inhibitors of the biological activity are shown in Figures 3 and 4. The magnitude of CO_2 emission of pure SSPHs ranged from 28 ± 7.2 to 280 ± 72 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, which meant high and very high biological activity, in accordance with known criteria for [2]. This activity is enough to cause considerable damage to SSPHs organic materials in the soils. The half-time period of microbial decay of SSPHs ranged from 0.5 to 2.6 years and only in the sample №5 with amphiphilic fillers in the form of dispersed peat it was 5.2 ± 1.5 years. Mixing of SSPHs with calcined sand and extracts of root rot greatly reduced the emission of CO_2 to values from 2.0 ± 0.9 to 19.4 ± 11.0 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (Figure 4). However, the biodegradation of SSPHs in such compositions, on the contrary, increases, probably due to an increase in the aeration and in the speed of colonization by microorganisms of the hydrogel within the coarsely textured macroporous substrate as compared to a pure hydrogel which is practically impermeable to air and microbes. Calculation by formulas (8) and (2) with the conditional period of biological activity of T_b = 200 days results in the values of $T_{0.5}$ from 0.2 ± 0.1 to 1.1 ± 0.2 years, which is 2–5 times less than in pure hydrogels. The typical time of 95% organic matter decomposition $T_{0.95}$ varies for pure SSPHs from 2.2 ± 1.1 to 22.6 ± 6.5 years, and for mixtures with sand from 0.4 ± 0.8 to 4.6 ± 3.0 years.

Low resistance of SSPHs to microbial decay in soils is confirmed by direct observations and forecast on the mathematical models of biodegradation [5]. A separated five-month-long incubation experiment in calcined quartz sand and polymineral sandy arenosol was performed for assessing the biodestruction rate of radiation-cross-linked technical polyacrylamide (sample №2) in thermostats at constant temperatures of 20, 30, and 37 °C, which simulated different biodestruction conditions in the humid and arid climatic zones. According to the exponential model of (1–3) the destruction rate obtained in the experiment at 37 °C temperature corresponded to biodegradation constants k of 0.7–2.7 $year^{-1}$ or SSPH half-life values of $T_{0.5}$ = 0.3–1.0 years. Almost complete destruction (95% of the SSPH) will be attained at this rate within 1.1–4.3 years according to the parameter $T_{0.95}$ (3). At this destruction rate, the effect of the SSPH apparently disappears within the first year after its addition in most cases. The incubation of the samples at 30 °C slightly decreased the degradation rate of the SSPH and kinetic constants of biodegradation, reduced here to 0.4–1.7 $year^{-1}$, giving half-lives $T_{0.5}$ = 0.4–1.7 years and $T_{0.95}$ = 1.8–7.5 years. The highest stability of the SSPH was revealed in an experiment at room

temperature (about 20 °C). The destruction rate was characterized by kinetic constants k of 0.2–1.5 year^{-1}, or the SSPH degradation half-lives $T_{0.5}$ = 0.5–3.5 years and $T_{0.95}$ = 2–15 years.

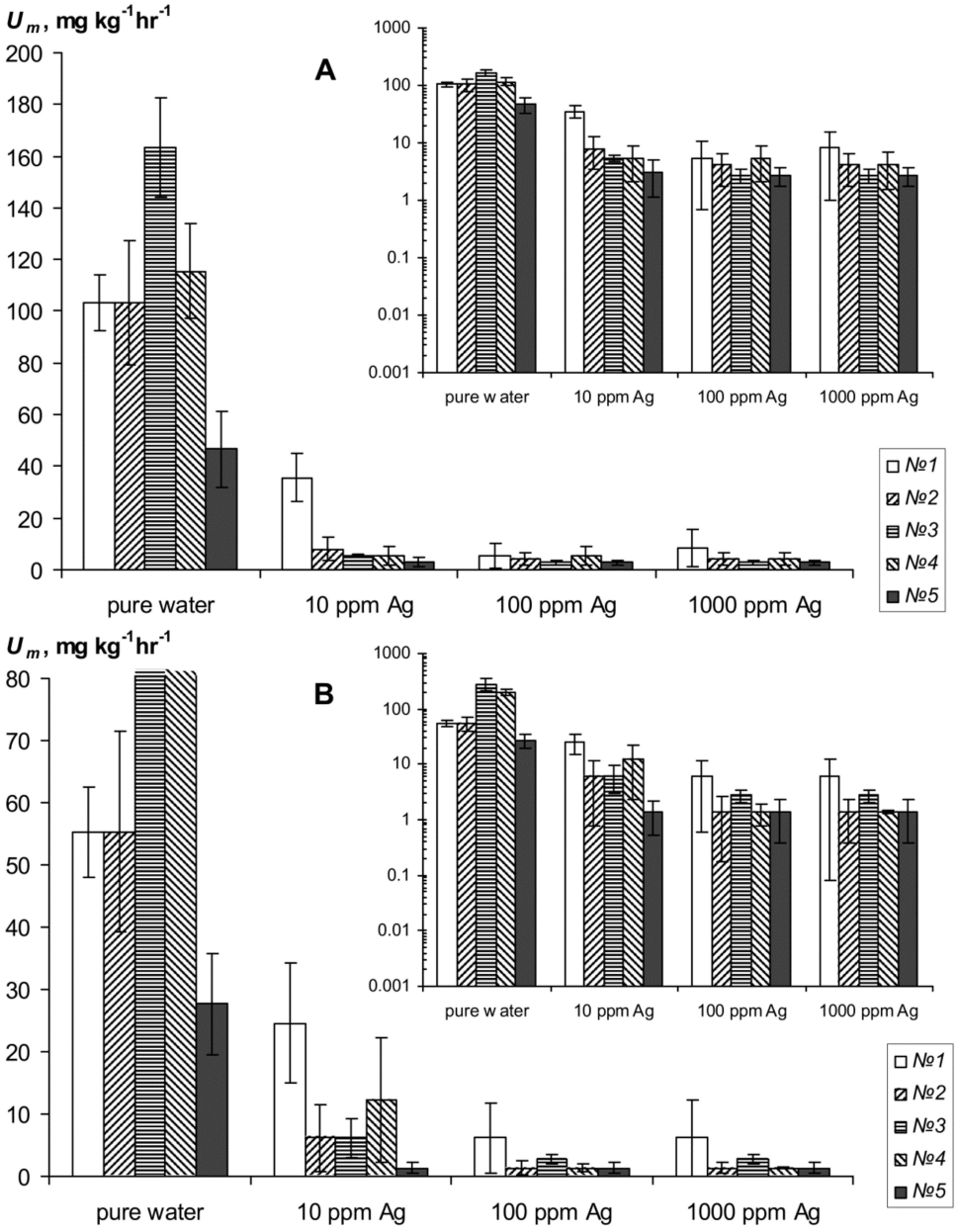


Figure 3. Carbon dioxid emission as an indicator of resistance to biodegradation of the hydrogels and their compositions with silver. №№1–4 are different types of hydrogels (see "Objects and methods"); (**A**) is ionic silver and (**B**) colloidal silver; insets are semi-logarithmic scale.

The generalized results of this experiments allowed revealing the temperature (T) dependence of the kinetic degradation constants of the SSPH [5]. It had an exponential form and was described by the following equation: $k(T) = 0.2834 \cdot \exp(0.0435 \cdot T)$. From the obtained relationship, the potential degradation of the hydrogel was calculated using the exponential model (mentioned above) of biodestruction [5]. Since hydrogels always contain water available for microorganisms, only the temperature dependence of the degradation was taken into account in this simplified version of the model. The temperature was taken as a function of time ($T(t)$) from the actual data obtained under arid and humid climatic conditions [5]. In particular, the data of the experimental station of the Qatar Ministry of Municipal and Agricultural Affairs for the arid zone were approximated by the least

squares method under S-plot 7 using the following empirical equation: $T(t) = T_0 + a \cdot \sin(2 \times 3.14t/b + c)$, where $a = 4.45$, $b = 23.85$, $c = 4.18$, and $T_0 = 38.14$. Numerical simulation in Matlab-7 software showed that the potential losses in this treatment make up 9–10% for 580 h (less than a month) and reach 33% of the initial content for three months regardless of the SSPH concentration (Figure 5A). The use of temperature data typical for the humid climatic conditions in the Moscow megapolis according to [4,26] with the spline approximation of the dependence $T(t)$ for an analogous numerical simulation showed that the destruction of the hydrogel proceeds in this case more slowly than in the irrigated arid soils. About 10–13% of the initial SSPH content (rate) is lost during a vegetation season. However, this is also a relatively high rate in technological terms.

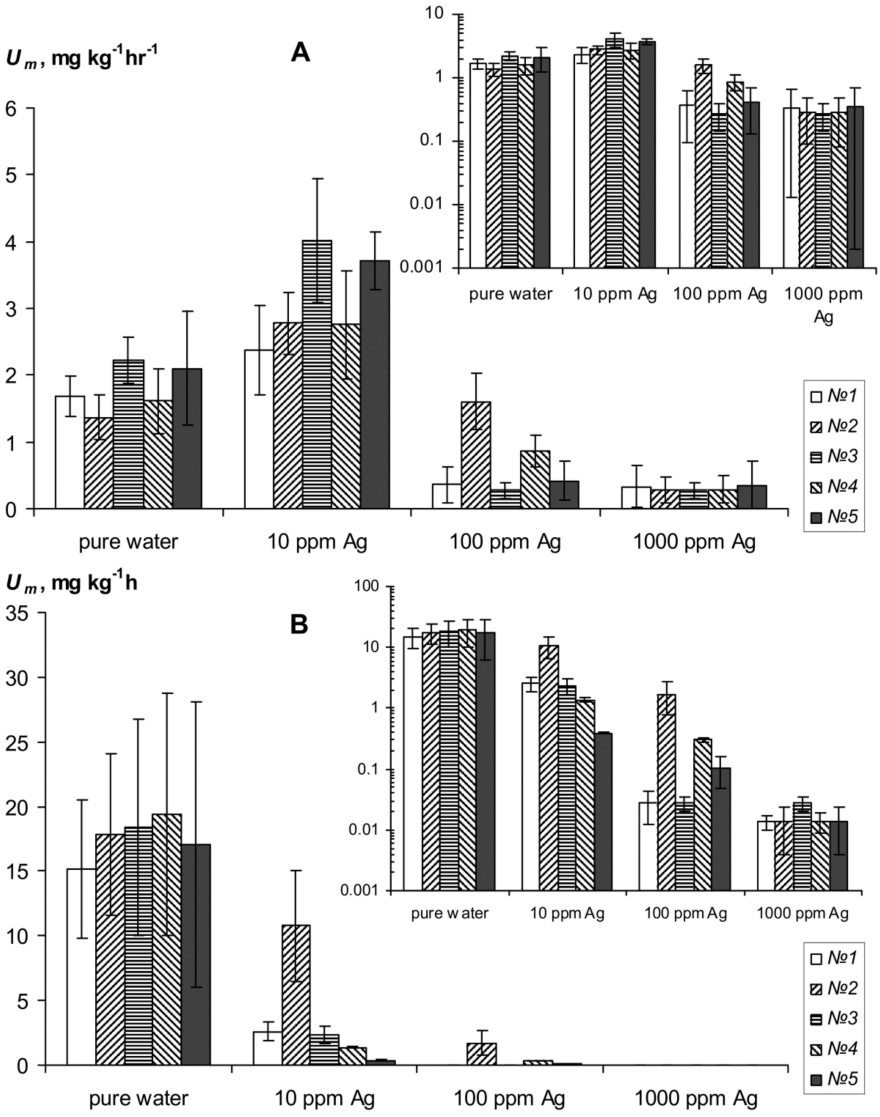


Figure 4. The change in U_m of hydrogels and gel compositions with silver in the case of mixing of root rot and sandy substrate; №№1–4 are different types of hydrogels (see "Objects and methods"); (**A**) is ionic silver and (**B**) colloidal silver; insets are semi-logarithmic scale.

The results of modeling the SSPHs biodegradation obtained above are in good agreement with the experimental estimate for SSPHs in urban soil constructions (Figure 5B). For a 0.1% dose of SSPH №2 at the soil surface, an experimental estimation in Moscow's humid conditions yields a biodegradation constant $k = 0.712$ year^{-1} or a half-life $T_{0.5} = 1$ year. A numerical model of biodegradation [5], taking into account the dynamics of the temperature regime in a megacity, yields a biodegradation constant

averaged over the vegetation season, k = 0.557 year^{-1} or a half-life $T_{0.5}$ = 1.2 year, which is close to the experimental estimation. For arid conditions of irrigated agriculture with high temperatures of the summer vegetation period (40 ± 12 °C), the value of $T_{0.5}$ decreases to 0.4 years, and the time for complete decomposition of the polymer $T_{0.95}$ is 1.8 years. For the humid conditions of the Moscow megacity, the $T_{0.95}$ estimate gives 4.2–5.2 years.

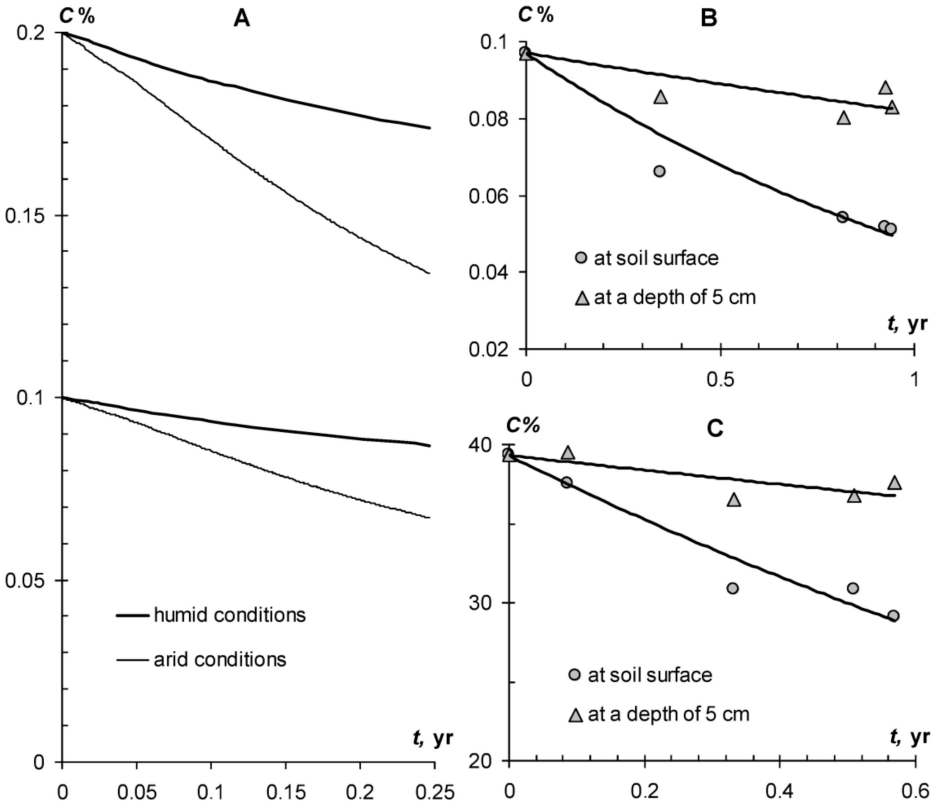


Figure 5. Modeling and experimental evaluation of biodegradation of organic soil-modifiers under different conditions. (**A**) modeling of biodegradation of SSHP (doses 0.1 and 0.2%) depending on temperature in humid and arid climates. (**B**) biodegradation of hydrogel, (**C**) biodegradation of peat soil modifier in experimental soil constructions for urban lawns (Moscow). The equations of exponential regression as an analytical solution of (1): (**B**) (at soil surface): $C\% = 0.1 \cdot \exp(-0.712 \cdot t)$, $R^2 = 0.93$; (**B**) (at depth of 5 cm): $C\% = 0.1 \cdot \exp(-0.171 \cdot t)$, $R^2 = 0.69$; (**C**) (at soil surface): $C\% = 39.3 \cdot \exp(-0.543 \cdot t)$, $R^2 = 0.93$. (**C**) (at depth of 5 cm): $C\% = 39.3 \cdot \exp(-0.118 \cdot t)$, $R^2 = 0.64$.

3.3. Dynamics of Technological Properties of Soil-Modifiers under the Influence of Biodegradation

In advertising soil conditioners, their service life in soils is often indicated, in particular for hydrogels it is estimated at 4–5 years, that is, time close to $T_{0.95}$. However, the linear biodegradation model (1), as well as real data, indicate rapid losses of biopolymers during the first year (Figures 2 and 5). Hence, their technological qualities should deteriorate at the same rapid pace. Figure 6A,B shows the dynamics of water retention curves of a monomineral quartz substrate and a polymineral silty-sand arenosol under the action of a working dose of 0.1% of hydrogel №2 (radiation-crosslinked polyacrylamide) during the biodegradation experiment at temperatures of 20, 30 and 37 °C. The dotted line shows the moisture potential for determining the field moisture capacity, according to Voronin's method [28]. Under the action of hydrogel, the physical state and water-retaining capacity of mineral coarsely dispersed substrates undergo strong changes. Hydrogels loosen the substrate, reducing bulk density of monomineral sand and arenesols from 1.3–1.5 g·cm^{-3} to 1.1–1.3 g·cm^{-3} and, respectively increasing the total moisture capacity (W_s) by 10% or more from 26 to 40% in sand and from 37 to 52% in arenesols. The field water capacity increases by 6–10%,

reaching values of 15% (sand) and 20% (arenesol), which is equivalent to a shift in the gradation by the granulometric composition from sand to sandy loams and light loams by water retention capacity.

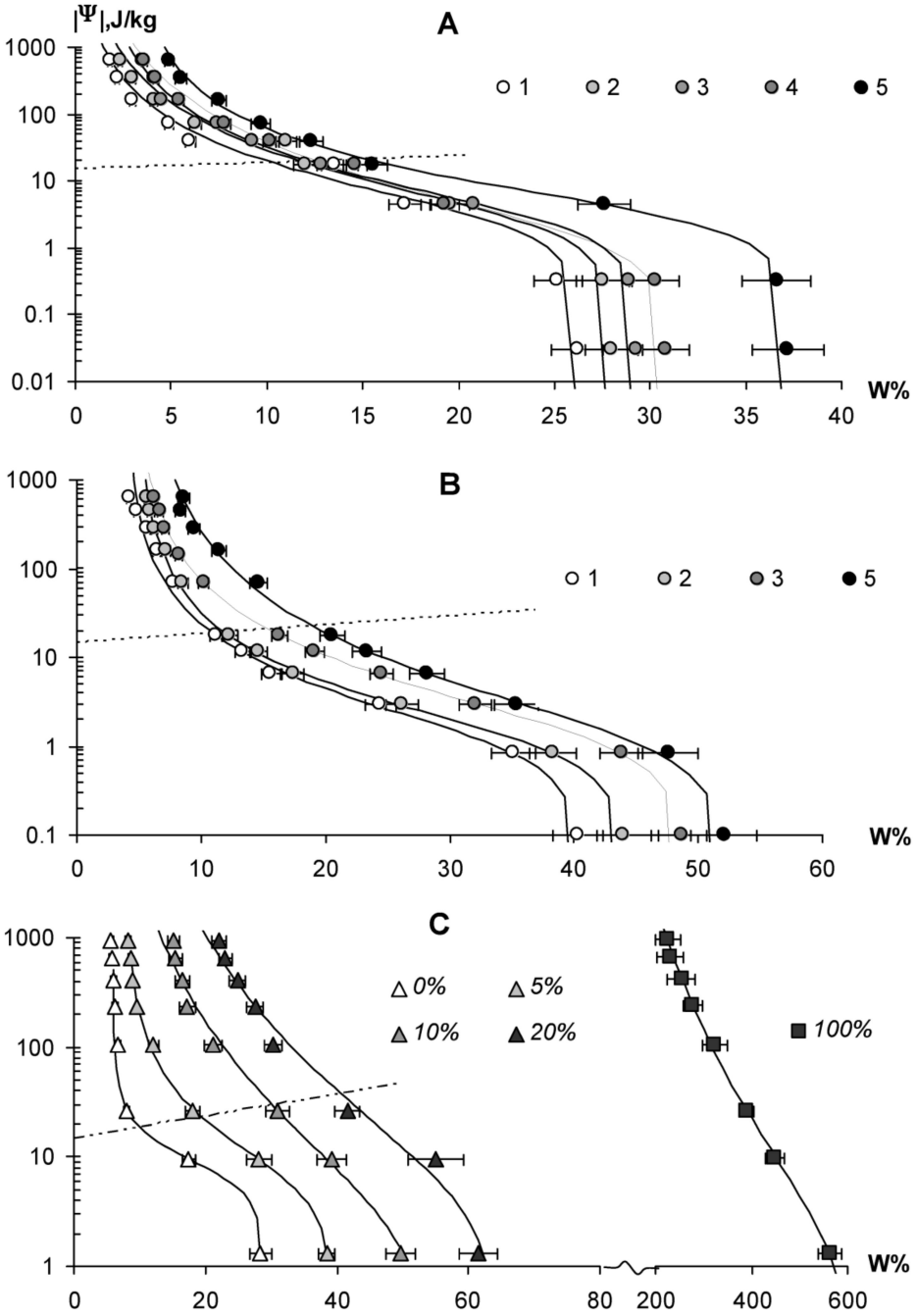


Figure 6. Dynamics of water-retaining capacity under the influence of soil conditioners and their biodegradation: (**A**) quartz sand, (**B**) silty-sand arenosol; 1–0% SSHP (control), 5–0.1% SSHP, experiment temperature: 2–37 °C, 3–30 °C, 4–20 °C; (**C**) peat soil modifier and its mixtures with monomineralic quartz sand; %—doses of the soil-modifier in the sand.

However, all these technological results are almost completely lost within one year with biodegradation of the hydrogel at a temperature of 37 °C. The water retention curves and the W_s = 28–44% as well as field moisture capacity (11–12%) calculated from them, in this case are statistically significantly different from the initial characteristics for the mineral substrates (Figure 6A,B). The smallest changes occurred at a minimum incubation temperature (20 °C). Here, the water retention

curves and the calculated moisture capacity were reduced by approximately half the original state with 0.1% hydrogel concentration. The incubation variant at 30 °C occupied an intermediate position between the variants from 20 and 37 °C, and here the level of degradation of technological properties reached 2/3. All the results obtained were completely logical, starting from the well-known rule of Vant-Hoff, according to which the intensity of (bio) chemical processes increases by 2–3 times for every 10 °C of the temperature. The maximum temperature (37 °C) was, apparently, within the temperature optimum for a group of microorganisms that decompose the hydrogel; otherwise a decrease in the intensity of the biodegradation was evident.

A similar conclusion about the significant loss of technological properties of soil conditioners in biodegradation follows from the comparison of data on the rate of decomposition of peat soil-modifiers (Figure 2) and their water-retaining capacity in mixtures with mineral sand substrates (Figure 6C). Losses from biodegradation in 10% of organic matter are equal to a minimum twofold decrease in the water-holding capacity of peat-sand mixtures containing 10–20% of peat. Quite likely in a year, 50% of the loss from biodegradation for a pure 100% soil-modifier also corresponds to 2–3 fold losses of moisture capacity and water retention energy, that is, significant technological deterioration.

3.4. Inhibition of Hydrogels Biodegradation by Silver Remedies

Introduction of silver inhibitors of the biological activity significantly reduces respiration and biodegradation in pure gel-silver compositions (Figures 3 and 4). In the case of silver ions under the action of a dose of 10 ppm U_m decreases at 13–30 times. The exception is the gel Aquasorb where U_m is reduced to not more than three times. Doses of 100–1000 ppm inhibit U_m 20–60 times without significant differences on the effects between them. As the result calculated values for the effective half-lives $T_{0.5}$ increase to 5–30 years in SSPH compositions with 10 ppm Ag and up to 25–50 years when the content of silver ions ranges from 100 to 1000 ppm. Silver nanoparticles have the same or a somewhat greater inhibitory effect. At the dose of 10 ppm Ag the value U_m is equal 6–25 mg·kg^{-1}·h^{-1} and $T_{0.5}$ varies from 6 to 20 years, and at doses of 100–1000 ppm U_m is equal 1.8–2.8 mg·kg^{-1}·h^{-1} and $T_{0.5}$ = 24–105 years.

In the case of mixtures of hydrogels with calcined sandy substrate and extracts from root rot, the silver inhibitors also strongly alter the biological activity and biodegradation rate of SSHP. Incorporation of ionic silver is effective only with large doses of 100–1000 ppm, which reduce U_m in 5–10 times to values of 0.3–1.0 mg·kg^{-1}·h^{-1} (Figure 4A). The value $T_{0.5}$ increases in this case up to 1.7–5 years. A low dose of silver ions at 10 ppm, on the contrary, stimulates biological activity, which is probably due to the adsorption of Ag + on the negatively charged surface of soil particles and to the growth of microflora under the influence of nitrate anions remaining in the soil solution. Silver nanoparticles have a more powerful inhibitory effect in mixtures of SSPH with soil substrate and root rot compared to the ionic forms (Figure 4B). Under the influence of a low dose of 10 ppm Ag the index of biological activity U_m is reduced to 6–40 times to values of 0.4–2.6 mg·kg^{-1}·h^{-1}. However, the calculated values of $T_{0.5}$ in this case remained low and did not exceed 1.1 ± 0.7 years, except for sample №5 with peat filler. For this sample U_m = 0.38 ± 0.04 mg·kg^{-1}·h^{-1} and $T_{0.5}$ = 3.7 ± 0.2 years. Higher doses of colloidal silver 100 ppm suppress U_m to values of 0.03–0.30 mg·kg^{-1}·h^{-1} except for sample №2 where the U_m = 1.7 ± 1.2 mg·kg^{-1}·h^{-1}. Such values of biological activity corresponded to half-lives of hydrogels T_{05} from 5 to 50 years. A maximum dose 1000 ppm leads to U_m about 0.01 ± 0.03 mg·kg^{-1}·h^{-1}, i.e., biological activity here is not statistically significantly different from zero. Calculated value $T_{0.5}$ in this case varied from 52 ± 10 to 105 ± 60 years. In general, despite the strong variation in the obtained estimates of the intensity of SSHP biodegradation, the results of incubation experiments (Figures 3 and 4) clearly confirm the increase in resistance of all types of hydrogels under the influence of silver inhibitors of biological activity. Presumably, the most effective doses of ions and silver nanoparticles are in the range of 10–100 ppm.

3.5. Dependence of Biodegradation Rate on Soil Depth and Nomographs for Assessing the Stability of Biopolymers in Urban Soil Design

In previous works, we investigated the dependence of biological activity (respiration) on soil depth (h, cm) [2,4]. This dependence often obeys an exponential model of the form:

$$U_m(h) = U_0 + a \cdot \exp(-bh), \tag{13}$$

where U_0, mg·kg^{-1}·h^{-1}, a, mg·kg^{-1}·h^{-1}; b, cm^{-1} are empirical constants (Figure 7). The upper figure represents the results of the assessment of the biological activity for different layers of sod-podzolic loamy soil at the experimental station of the Moscow State University "Chashnikovo" using the usual method of incubation (U_1) and its modification with thermal desorption and degassing of carbon dioxide (U_2). Figure 7B shows the results of respiration assessment by standard closed-chambers method in same soil, covered by sand's layer (sandy screen on surface of the soil) depending on its thickness. In both cases, for natural soil and artificial construction on its basis, biological activity decreases exponentially with depth, according to the model (13). Similar models are known for the distribution of roots and microorganisms in soils [22]. Apparently, the exponential function (13) with a rapid decline in biological activity with distance from the soil surface reflects the specific distribution of living organisms, organic substrates, as well as oxygen diffusing out of the atmosphere, that is, all the necessary components of aerobic biodegradation. The parameter b, which is responsible for the intensity of the decline in biological activity with depth for most mineral soils, excluding chernozems, varies in the range $0.1 \leq b \leq 1$ cm^{-1}. By analogy with the characteristic times of biodegradation (2), (3), for (13) it is possible to introduce indicators of characteristic depths of 50%, and 95% concentration of biological and biochemical sources of aerobic destruction of organic substances in soil [30] $H_{0.5} = \ln(2)/b$, $H_{0.95} = 3/b$. For the above range b, they will vary from 1 to 7 cm ($H_{0.5}$) (and from 3 to 30 cm ($H_{0.95}$). A sharp (exponential) decrease in the intensity of biological activity with depth means the same decrease in the rate of biodegradation of organic substances when they are removed from the soil surface. Formula (14) allows, in a first approximation, to estimate at what depth (H) it is necessary to arrange the soil modifier in order to reduce its biodegradation by a predetermined number of times (n) with respect to decomposition on the soil surface [4]:

$$H = \frac{\ln(n)}{b} \tag{14}$$

For the convenience of calculations, we propose using nomographs that allow us to estimate how many times the decomposition of the biopolymer material will decelerate when it is buried at some distance from the soil surface (Figure 8). The upper nomograph uses the exponential rate of decrease in biological activity with depth (b), according to the model (14). The known value of b, plotted on the abscissa axis, gives a point on the graphic line, the ordinate of which represents the required depth. For example, if $b = 0.35$ cm^{-1} and we want to reduce biodegradation by 4 times (the fourth line from the top), then the depth H will be 4 cm.

Since the exponent b must be determined experimentally, in the simplified version of the nomograph (lower Figure 8), it is possible to make an estimate by the size of the zone of the most active microbial transformation of organic substances ($H_{0.95}$). There is a reason to identify this value with the size of the biogenic (humus) soil layer, which for most soils, excluding chernozems and peat bogs, usually does not exceed 20–30 cm [30]. Therefore, in the nomograph, the range of variation in the size of the biogenic soil horizon is determined by the inequality $6 \leq H_{0.95} \leq 30$ cm. The calculation by simplified nomograph is similar to the previous one. For example, if in the urban soil the biogenic, humified horizon had a thickness of 20 cm, then biopolymer material must be placed at a depth of $H = 6$ cm in order to reduce the biodegradation intensity twice (third line of the nomograph from the top).

Obtained results of the technological modeling were successfully confirmed by practical experiments carried out on layered soil constructions for lawns in the conditions of Moscow megacity (Figure 5B,C). Shielding of soil-modifiers by a 5 cm layer of sand or the so-called "sanding of the lawn" led to the conservation of organic matter and its protection from biodegradation. The decrease in the kinetic constants of destruction (k) was 4–5 times (from 0.71 year^{-1} to 0.17 year^{-1} in the case of SSHP and from 0.54 year^{-1} to 0.12 year^{-1} for peat). The corresponding losses of organic matter per year compared with the decomposition rate on the surface decreased by 3.8 times for a peat soil modifier, and by 3.2 times for a SSHP. This practical result is in good agreement with the theoretical calculation of the proposed nomogram method. With the size of the biologically active layer with organic conditioners ($H_{0.95}$) in soil constructions of 10 cm, according to the lower nomograph (Figure 8), the intensity of destruction in the case of 5–6 cm of the screen should decrease by 3–4 times, which was actually observed.

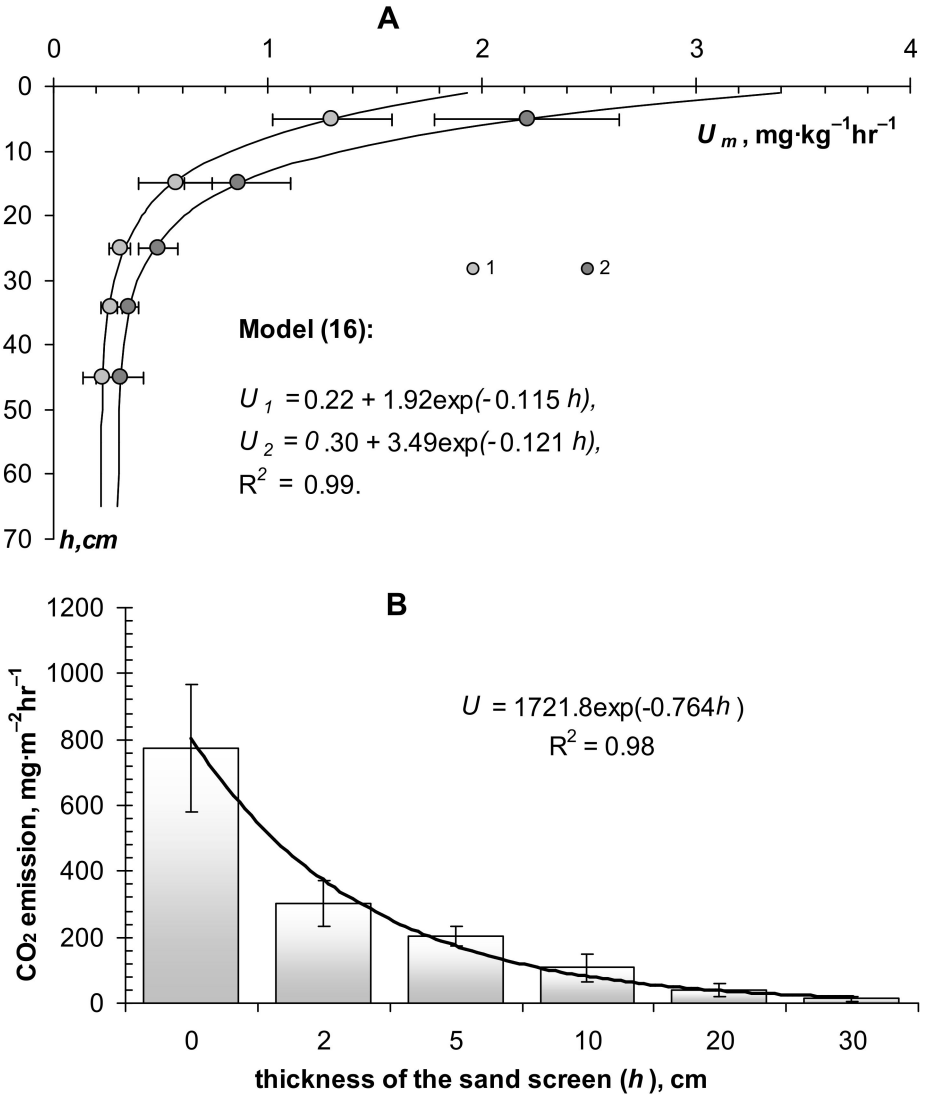


Figure 7. Dependence of biological activity (respiration) on the depth of the soil (**A**) and on the thickness of the sand layer covering the soil surface (**B**).

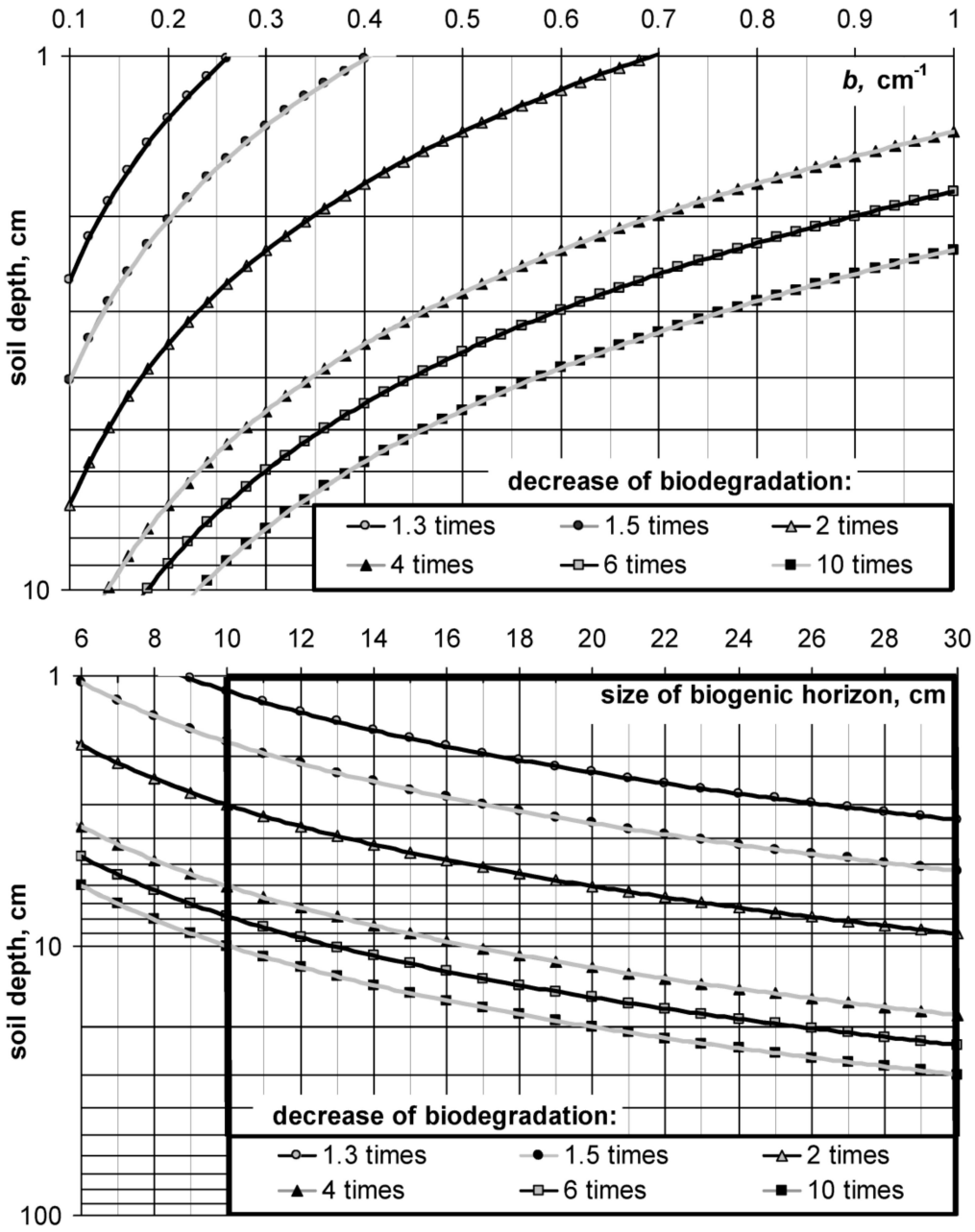


Figure 8. Nomographs for assessing the effect of deepening of organic soil-modifiers on their biodegradation in soils and soil constructions, according [4].

4. Discussion

4.1. Biodegradation of Peat

Analysis of the known information on the rate of biodegradation of peat and peat-mineral mixtures gives contradictory data. The estimates given in the "Introduction" of $T_{0.5}$ = 5–50 years and $T_{0.95}$ up to 250 years for peat of the upper (active) layer in boreal and tropical bogs refer to the natural moistening conditions. Perhaps these values even overestimate the intensity of this process. Latter at al. [31], studying the decomposition of the predominant plant litters on Pennine moorland in northern England during long-term 23 years experiment, found that the actual rate of biodegradation is lower compared to estimates by the incubation method and in short-term field experiments. A similar conclusion about the strong deceleration of biodegradation for a long time was obtained in the work on

mathematical modeling of this process [32]. However, in all the cases analyzed above, biodegradation of peat was restrained by anaerobic conditions in natural bog ecosystems or in artificial incubation experiments. Drainage (aeration) greatly accelerates biodegradation and under aerobic conditions, peat loses its resistance to decomposition. According to Figure 1, only a small decrease in peat moisture to 0.6–0.7 W_s is sufficient for a sharp increase in destruction. As a result, drained peatlands degrade rapidly and lose catastrophically the main amount of organic matter in the first 5–10 years at a rate of up to 10–12 t·ha^{-1}·year^{-1} [16] or more than 2% C·year^{-1} in soils with carbon contents greater than 100 g·kg^{-1} [1]. Such lands, because of the negative carbon balance, are converted into intensive sources of carbon dioxide [33]. By analogy, the high rate of CO_2 production by urban soils may be associated with an increased content of organic substrates, including peat-sand mixtures for gardening [4,26,34,35]. The high contribution of soil cover to urban CO_2 emissions is shown experimentally in [36]. According to this study, summer CO_2 emissions from soils in the residential areas of Greater Boston (USA) can reach 72% of the anthropogenic source (fuel combustion).

Reverse positive relationship of biodegradation with temperature increases peat decomposition under local greenhouse effect conditions [37,38]. For cities such a factor may be the so-called "urban heat island" [26,39]. In this case, the period of biological activity is prolonged for the cold season and biodegradation of peat during winter thaws can reach 20–25% of average annual losses (see "Results"). Additional stimulation of biodegradation of peat and peat mixtures in the megalopolis is also possible due to the priming effect [18], for example, from easily degradable plant residues in the form of mown lawn grass, faeces of domestic animals and organic debris. All these facts explain the obtained above high values of biodegradation rate of peat soil-modifiers in urban environments, with loss of organic matter, up to 50–60% in the first year, with the half-lives $T_{0.5}$ about 1 year and $T_{0.95}$ not more than 4 years.

4.2. Biodegradation of Synthetic Hydrogels and Their Components

On the problem of biodegradation of SSHP, published sources give meager and very contradictory data concerning mainly acrylamide (AAM) and polyacrylamide (PAA). We exclude from consideration numerous advertising information about the stability of SSHP in soils for 5–6 years or more, because in our opinion they are not correspond to reality. Lentz et al. [40] reports a rather slow biodegradation of PAA not more than 10% year^{-1} primarily through the shear-induced chain scission and photodegradation. According to the exponential model (1–3), this corresponds to k = 0.11 year^{-1}. In this case, the half-life of PAA hydrogels $T_{0.5}$ = 6.6 years and $T_{0.95}$ = 28.5 years, which significantly exceeds our results $T_{0.5}$ = 1–1.2 years and $T_{0.95}$ = 4.2–5.2 years for the radiation-crosslinked PAA (sample *N*º2) obtained in this work and previous publication [5].

However, there are other data that offer an alternative perspective. Some studies found that polyacrylamide (PAM) and acrylamide monomer degradation in soil is very rapid with half-life values about few days [41–45]. Sojka and Entry [45] have reported that PAM was completely degraded within five days after applying 500 mg kg^{-1} garden soil. Lande et al. [41] have estimated the half-life of acrylamide monomer in agricultural soils ranged from 18 to 100 h at a concentration of 25–500 mg kg^{-1} and a temperature of 20–22 °C. Increasing the initial concentration or decreasing the temperature have increased the half-life [41,42]. The use of PAA and other acrylic hydrogels had no adverse effects on soil microbial communities and often statistically significantly increased the respiration of the soil (CO_2 emission) [4,46,47]. Soil microorganisms are capable of utilizing PAM or acrylamide as a source of nitrogen [42,44,45]. As shown in [42] acrylamide monomer is subject to biodegradation in soils and its transformation is assumed to be due to amidase activity. All these facts indicate a low potential stability of acrylic hydrogels in soils and the dominant mechanism of their biological (biochemical) degradation, rather than chemical or photochemical decomposition. The main controlling factors of biodegradation of acrylic SSHP are their composition, temperature and the depth of localization in the soil [4,5]. Soil moisture is not so important, because hydrogels almost always contain water available for microorganisms. While the large changes in soil humidity that cause the transition from anaerobic

to aerobic conditions, for example in rice paddies, strongly influence the biodegradation of SSHP, increasing it after aeration of the soil [40].

Data on the effect of microflora inhibitors on SSHP biodegradation have not been found and, apparently, our studies are pioneering in this area. However, the values of the effective concentrations of ions and silver nanoparticles in 10–100 ppm obtained in our research are in good agreement with the published results [48–50] for fungicide and bactericide efficiency of aqueous and colloidal silver solutions with an effective concentration range of 1–50 up to 100 ppm. In the soil, for which protective hydrogel compositions are designed, effective concentration of silver suppressing the growth of plants vary in the range of 50–1000 mg/kg of the solid phase [51]. In terms of soil solution it gives at the range from 250 to 5000 ppm (20% water content). Shclich et al. [52] reported similar values from 200 to 400 ppm for earthworms in the soil at experimental doses of ionic and colloidal silver from 15 to 1000 mg/kg or from 75 to 5000 ppm at 20% soil moisture. Even if we assume an unlikely event of leaching of all silver with fast biodegradation of SSHP, the concentrations in the soil solution of 10–100 ppm will not exceed the threshold, which is dangerous for plants and soil invertebrates.

4.3. Dependence of Biodegradation Intensity on Soil Depth

Despite the obvious idea of reducing the rate of biodegradation of organic substances with soil depth, quantitative studies in this area are practically absent. Strong differences in the characteristic times of biodegradation of organic soil components are usually explained only by their composition and association with mineral components. There is general agreement in soil science that the distribution of organic matter decomposition rates tends to cluster at three very different time scales: Subannual, decadal-century, and longer [3,14]. This idea is supported by almost all modern models of dynamics of soil organic matter [32]. Fresh litter compounds, microbial cell, root exudates or so-called "active pool" decompose on time scales of hours or months to years. Highly stabilized organic matter, typically associated with mineral surfaces or very stable aggregates, persists in soils for thousands of years and is often referred to as the "passive" or "millennial cycling C" pool. The remaining "intermediate" or "slow" pool has turnover times in the range of decades to centuries, and may consist of structural components of plant detritus more resistant to decay, or soil humus that have been stabilized by their association with soil minerals or aggregate structures [3]. We consider this approach to be incomplete and suggest supplementing it with information on the vertical differentiation of biodegradation of organic substances in soils. In the upper biological and chemically active soil horizon (no more than 10–20 cm for most soils), aerobic biodegradation is very strong and copes rapidly on a geological scale of time with any organic matter, including hard-decomposable (lignin, humus, bio-coal, asphaltenes, etc.). That is the reason why the average time of turnover of the organic matter of soils is estimated in tens of years, and the radiocarbon dating of the organic matter of the upper horizons does not exceed the first hundred years (see Introduction). Probably, rapid biodegradation of organic substances in the surface active layer of soil is associated with optimal thermodynamic conditions (T, W), maximum biodiversity and concentration of microorganisms, enzymes, free oxygen and substances that stimulate this process by the principle of priming effect [18]. Only at a distance from the soil surface can we find organic matter with the age of several thousand years by radiocarbon method, such as in chernozems, peat bogs or buried soils [3,11]. A sharp decrease in the rate of biodegradation with soil depth should be taken into account when designing soil constructions in order to increase the stability of organic substances and their service life [4,5]. For example, reclamation technologies for peat soils based on applying sand in doses of 200–1600 m^3 ha^{-1} with subsequent mixing with peat give a significant increase in productivity but are often accompanied by acceleration of peat decomposition [16,53]. The layered method of sand introducing, or so-called "cover structure", as it follows from our nomographs (Figure 8), reduces the intensity of biodegradation of peat material. According to the experimental data of Polesskaya experimental station (Belarusian research Institute of land reclamation and water management, Brest region, Belarus), peat coating with a layer of sand

of 4 cm slows its decomposition by approximately 1.6 times, and with a layer size of 10 cm up to 2–2.5 times, and this effect is persistently maintained throughout the four-year field experience [16].

It is equally important, in our opinion, to introduce the idea of a sharp reduction in biodegradation with soil depth in the models for predicting the behavior of xenobiotics, in particular, pesticides in soils. Usually the penetration of pesticides into groundwater is mostly associated with preferential flows [54], whereas there is another mechanism, namely the conservation of pesticides at a distance from the active biodegradation layer with gradual subsequent leaching to the vadose zone.

We would like to emphasize once again that absolutely stable organic substances for improving or impairing the quality of soil do not exist, and our ability to manage the ecological state of soils and create stable artificial soils is largely determined by the knowledge of the natural patterns of soil organic matter biodegradation. However, biodegradation of polymeric materials in soils is now extremely important in the utilization of numerous materials by mankind for their needs [55]. We hope that the approach proposed in the article to the quantitative assessment of biodegradation in soils will be useful for solving the problem of utilization of biodegradable polymers as environmentally safe materials/

5. Conclusions

1. Biodegradation of organic soil conditioners in biologically and chemically active soil environment is the main factor reducing their effectiveness and quality, most notably including water-retention capacity.
2. Traditionally used in urban landscaping, peat-based soil modifiers in Moscow conditions lose up to 50–60% of organic matter during the first year due to intensive biodegradation with a half-life $T_{0.5}$ about 1 year and $T_{0.95}$ not more than 4 years.
3. Incubation experiments with natural and synthetic polymers revealed an exponential dependence of the rate of biodegradation from temperature and more complicated dependence from humidity with a maximum near 0.6–0.7 W_s (soil water saturation). For its description, a new two-parameter empirical model is proposed.
4. Modern soil conditioners in the form of synthetic polymeric hydrogels based on polyacrylamide and acrylates are susceptible to microbial degradation and are characterized by half-lives of 0.5 to 2.6 years (to 5.2 $\pm$ 1.5 years in the case of the SSPH filling by dispersed peat).
5. Mixing hydrogel compositions with a mineral soil substrate and putrefactive micro-organisms leads to a sharp increase of biological activity and biodegradation of SSPH; their half-lives not exceed one year.
6. The protective composition on the basis of hydrogels and silver inhibitors are more resistant to biodegradation. Calculated half-lives in them with a small dose of silver in 10 ppm range from five to 30 years, and with large doses of 100–1000 ppm can reach 25–50 years and above. Silver nanoparticles have generally stronger inhibitory effect compared to ions.
7. The rapid (exponential) decrease in the intensity of biodegradation with the depth of the soil makes it possible significantly (2–4 times or more) increase the stability of organic soil-modifiers if they are located at a distance from the soil surface in the process of creating a layered urban constructozems.

6. Patents

The results of the work are used in the synthesis technology of biodegradation-resistant filled hydrogels patented in the Russian Federation:

Patent RU 2536509 (http://www.findpatent.ru/patent/253/2536509.html, 21 June 2018);
Patent RU 2639789(http://www.findpatent.ru/patent/263/2639789.html, 21 June 2018).

Author Contributions: Conceptualization, methodology, modeling and paper writing: A.V.S.; Laboratory experiments on hydrogels and statistical data processing: N.B.S.; Field experiments on peat and monitoring of humidity and temperature in urban soil and design of soil constructions; translation of the paper: V.I.V.; Laboratory experiments on peat and field experiments on hydrogels: M.V.S.

Funding: This research was funded by The Russian Scientific Foundation, grant number 16-16-04014 (general provisions, the study of hydrogels, mathematical modeling) and grant number 17-77-20046 (the study of peat soil-modifiers)

Acknowledgments: The authors sincerely thank Marina and Yuri Miller (University of California San Diego, USA) and Morgan M. Williams (University of California, Berkeley, USA) for the assistance in spelling and technical preparation of the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The founding sponsors had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

References

1. Bellamy, P.H.; Loveland, P.J.; Bradley, R.I.; Lark, R.M.; Kirk, G.J.D. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature* **2005**, *437*, 245–248. [CrossRef] [PubMed]
2. Certini, G.; Scalenghe, R. *Soils: Basic Concepts and Future Challenges*; Certini, G., Scalenghe, R., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2006; 310p, ISBN 10 0-521-85173-4.
3. Torn, M.S.; Swanston, C.W.; Castanha, C.; Trumbore, S.E. Storage and turnover of organic matter in soil. In *Biophysico-Chemical Processes Involving Natural Nonliving Organic Matter in Environmental Systems*; Senesi, N., Xing, B., Huang, P.M., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2009; pp. 219–272.
4. Smagin, A.V. *Teoria i Praktika Construirovania Pochv [Theory and Practice of Soil Engeneering]*; Moscow State University Press: Moscow, Russia, 2012; 544p, (In Russian). ISBN 978-5-211-06299-3.
5. Smagin, A.V.; Sadovnikova, N.B.; Smagina, M.V. Biodestruction of strongly swelling polymer hydrogels and its effect on the water retention capacity of soils. *Eurasian Soil Sci.* **2014**, *47*, 591–597. [CrossRef]
6. Smagin, A.V. Theory of soil stability. *Eurasian Soil Sci.* **1994**, *27*, 17–32.
7. Andren, O.; Katterer, T. ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Ecol. Appl.* **1997**, *7*, 1226–1236. [CrossRef]
8. Raich, J.W.; Schlesinger, W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* **1992**, *44*, 81–99. [CrossRef]
9. Silver, W.L. The potential effects of elevated CO_2 and climate change on tropical forest soils and biogeochemical cycling. *Clim. Chang.* **1998**, *39*, 337–361. [CrossRef]
10. Bridges, E.M.; Batjes, N.H. Soil gaseous emissions and global climate change. *Geography* **1996**, *81*, 155–169.
11. Chichagova, O.A. Modern trends in radiocarbon studies of organic matter of soils. *Eurasian Soil Sci.* **1996**, *29*, 89–100.
12. Tribis, V.P. Estimation of the peaty soils organic matter mineralization rate. *Sov. Soil Sci.* **1990**, *23*, 105–110.
13. Murasyama, S.; Abu Bakar, Z. Decomposition of tropical peat soils. *JARQ* **1996**, *30*, 145–158.
14. Cadisch, G.; Giller, K.E. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*; Cab International: Wallingford, UK, 1997; 409p.
15. Yule, C.M.; Gomez, L.N. Leaf litter decomposition in a tropical peat swamp forest in Peninsular Malaysia. *Wetl. Ecol. Manag.* **2009**, *17*, 231–241. [CrossRef]
16. Bambalov, N.N. *Balance of the Organic Matter of Peat Soils and Methods of Its Study*; Science and Technology: Minsk, Russia, 1984; 175p. (In Russian)
17. Thevenot, M.; Dignac, M.F.; Rumpel, C. Fate of lignins in soils: A review. *Soil Biol. Biochem.* **2010**, *42*, 1200–1211. [CrossRef]
18. Fontaine, S.; Mariotti, A.; Abbadie, L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.* **2003**, *35*, 837–843. [CrossRef]
19. Kuzyakov, Y.; Bogomolova, I.; Glaser, B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific 14C analysis. *Soil Biol. Biochem.* **2014**, *70*, 229–236. [CrossRef]
20. Smagin, A.V. Biological oxygen demand in soils and hydrogel compositions for plant protection of the rhizosphere. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2018**, *121*, 022038. [CrossRef]

21. Smagin, A.V.; Sadovnikova, N.B. Creation of Soil-Like Constructions. *Eurasian Soil Sci.* **2015**, *48*, 981–990. [CrossRef]
22. Campbell, G.S. *Soil Physics with BASIC*; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 1985; 268p.
23. Smagin, A.V. Thermodynamic evaluation of the impact of strongly swelling polymer hydrogels with ionic silver on the water retention capacity of sandy substrate. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2017**, *52*, 012087. [CrossRef]
24. Krutyakov, Y.; Kudrinskiy, A.; Zherebin, P.; Yapryntsev, A.; Pobedinskaya, M.; Elansky, S.; Denisov, A.; Mikhaylov, D.; Lisichkin, G. Tallow amphopolycarboxyglycinate-stabilized silver nanoparticles: New frontiers in development of plant protection products with a broad spectrum of action against phytopathogens. *Mater. Res. Express* **2016**, *3*, 075403. [CrossRef]
25. Creamer, R.E.; Schulte, R.P.O.; Stone, D. Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter? *Ecol. Indic.* **2014**, *36*, 409–418. [CrossRef]
26. Vasenev, V.I.; Smagin, A.V.; Ananyeva, N.D.; Ivashchenko, K.V.; Gavrilenko, E.G.; Prokofeva, T.V.; Patlseva, A.; Stoorvogel, J.J.; Gosse, D.D.; Valentini, R. Urban Soil's Functions: Monitoring, Assessment, and Management. In *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*; Rakshit, A., Abhilash, P.C., Singh, H.B., Ghosh, S., Eds.; Springer: Singapore, 2017; pp. 359–409.
27. ISO 16072. *Soil Quality—Laboratory Methods for Determination of Microbial Soil Respiration*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2002.
28. Smagin, A.V. Theory and methods of evaluating the physical status of soils. *Eurasian Soil Sci.* **2003**, *36*, 301–312.
29. Van Genuchten, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1980**, *44*, 892–898. [CrossRef]
30. Bogatyrev, L.G.; Smagin, A.V.; Akishina, M.M.; Vityazev, V.G. Geographical aspects of forest litters. *Mosc. Univ. Soil Sci. Bull.* **2013**, *68*, 26–31. [CrossRef]
31. Latter, P.M.; Howson, G.; Howard, D.M.; Scott, W.A. Long-term study of litter decomposition on a pennine peat bog: Which regression? *Oecologia* **1997**, *113*, 94–103. [CrossRef] [PubMed]
32. Manzoni, S.; Pineiro, G.; Jackson, R.B.; Jobbagy, E.G.; Kim, J.H.; Porporato, A. Analytical models of soil and litter decomposition: Solutions for mass loss and time-dependent decay rates. *Soil Biol. Biochem.* **2012**, *50*, 66–76. [CrossRef]
33. Heller, C.; Zeitz, J. Stability of soil organic matter in two northeastern German fen soils: The influence of site and soil development. *J. Soils Sediments* **2012**, *12*, 1231–1240. [CrossRef]
34. Kaye, J.P.; McCulley, R.L.; Burke, I.C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* **2005**, *11*, 575–587. [CrossRef]
35. Pouyat, R.V.; Yesilonis, I.D.; Nowak, D.J. Carbon storage by urban soils in the United States. *J. Environ. Qual.* **2006**, *35*, 566–575. [CrossRef] [PubMed]
36. Decina, S.M.; Hutyra, L.R.; Gately, C.K.; Getson, J.M.; Reinmann, A.B.; Gianotti, A.G.; Templer, P.H. Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area. *Environ. Pollut.* **2016**, *2012*, 433–439. [CrossRef] [PubMed]
37. Davidson, E.A.; Janssens, I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **2006**, *440*, 165–173. [CrossRef] [PubMed]
38. Delarue, F.; Gogo, S.; Buttler, A.; Bragazza, L.; Jassey, V.E.J.; Bernard, G. Indirect effects of experimental warming on dissolved organic carbon content in subsurface peat. *J. Soils Sediments* **2014**, *14*, 1800–1805. [CrossRef]
39. Oke, T.R. The heat island of the urban boundary layer: Charcteristics, causes and effects. In *Wind Climate in Cities*; Cermak, J.E., Ed.; Kluwer Academic: Dordrecht, The Netherlands, 1995; pp. 81–107.
40. Lentz, R.D.; Andrawes, F.F.; Barvenik, F.W.; Koehn, A.C. Acrylamide monomer leaching from polyacrylamide-treated irrigation furrows. *J. Environ. Qual.* **2008**, *37*, 2293–2298. [CrossRef] [PubMed]
41. Lande, S.S.; Bosch, S.J.; Howard, P.H. Degradation and leaching of acrylamide in soil. *J. Environ. Qual.* **1979**, *8*, 133–137. [CrossRef]
42. Abdelmagid, H.M.; Tabatabai, M.A. Decomposition of acrylamide in soils. *J. Environ Qual.* **1982**, *11*, 701–704. [CrossRef]
43. Shanker, R.; Ramakrishna, C.; Seth, P.K. Microbial degradation of acrylamide monomer. *Arch. Microb.* **1990**, *154*, 192–198. [CrossRef]

44. Kay-Shoemake, J.L.; Watwood, M.E.; Sojka, R.E.; Lentz, R.D. Polyacrylamide as a substrate for microbial amidase in culture and in soil. *Soil Biol. Biochem.* **1998**, *30*, 1647–1654. [CrossRef]
45. Sojka, R.E.; Entry, J.A. Influence of polyacrylamide application to soil on movement of microorganisms in runoff water. *Environ. Pollut.* **2000**, *108*, 405–412. [CrossRef]
46. Barvenik, F.W. Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Sci.* **1994**, *158*, 235–243. [CrossRef]
47. Basanta, M.R.; Diaz-Ravina, M.; Gonzalez-Prieto, S.J.; Carballas, T. Biochemical properties of forest soils as affected by a fire retardant. *Biol. Fertil. Soils* **2002**, *36*, 377–383.
48. De Lucca, J.; Boue, S.; Sien, T.; Cleveland, T.E.; Walsh, T.J. Silver enhances the in vitro antifungal activity of the saponin, CAY-1. *Mycoses* **2011**, *54*, e1–e8. [CrossRef] [PubMed]
49. Rai, M.K.; Deshmukh, S.D.; Ingle, A.P.; Gade, A.K. Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *J. Appl. Microbiol.* **2012**, *112*, 841–852. [CrossRef] [PubMed]
50. Kim, S.W.; Jung, J.H.; Lamsal, K.; Kim, Y.S.; Min, J.S.; Lee, Y.S. Antifungal effect of silver nanoparticles (AgNPs) against various plant pathogenic fungi. *Mycobiology* **2012**, *40*, 53–58. [CrossRef] [PubMed]
51. Langdon, K.A.; McLaughlin, M.J.; Kirby, J.K.; Merrington, G. Influence of soil properties and soil leaching on the toxicity of ionic silver to plants. *Environ. Toxicol. Chem.* **2015**, *34*, 2503–2013. [CrossRef] [PubMed]
52. Schlich, K.; Klawonn, T.; Terytze, K.; Hund-Rinke, K. Effects of silver nanoparticles and silver nitrate in the earthworm reproduction test. *Environ. Toxicol. Chem.* **2013**, *32*, 181–188. [CrossRef] [PubMed]
53. Zaidel'man, F.R.; Kozhevin, P.A.; Shvarov, A.P.; Pavlova, E.B.; Gorlenko, M.V. The effect of different sanding methods on the biological activity and gas regime of drained peat soils. *Eurasian Soil Sci.* **2001**, *34*, 207–217.
54. Jarvis, N.J. *The MACRO Model (Version 3.1). Technical Description and Sample Simulations*; Reports and Dissertations 19; Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Science: Uppsala, Sweden, 1994; 51p.
55. Vroman, I.; Tighzert, L. Biodegradable polymers. *Materials* **2009**, *2*, 307–344. [CrossRef]

© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ISSN 1064-2293, Eurasian Soil Science, 2018, Vol. 51, No. 12, pp. 1462–1473. © Pleiades Publishing, Ltd., 2018.
Original Russian Text © A.V. Smagin, N.B. Sadovnikova, A.V. Kirichenko, Yu.V. Egorov, V.G. Vityazev, A.S. Bashina, 2018, published in Pochvovedenie, 2018, No. 12, pp. 1478–1491.

SOIL PHYSICS

Dependence of the Osmotic Pressure and Electrical Conductivity of Soil Solutions on the Soil Water Content

A. V. Smagin[a, b, *], N. B. Sadovnikova[a, b], A. V. Kirichenko[a], Yu. V. Egorov[a], V. G. Vityazev[a], and A. S. Bashina[a, b]

[a] *Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*
[b] *Institute of Forestry, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya 21, Uspenskoe, Moscow oblast, 143030 Russia*
**e-mail: smagin@list.ru*

Received February 28, 2018

Abstract—The osmotic pressure and electrical conductivity were determined with the use of instrumental methods (centrifuging, conductometry, and cryoscopy) in equilibrium soil solutions as the functions of moisture (the mass ratio between solid and liquid phases) for the soils of different geneses and textures. These functions proved to have a nonlinear character with one extremum. A theoretical substantiation to this phenomenon is suggested. It is based on the concept of competing interphase interactions in soil and develops the classical ideas by A.A. Rode. Upon the low soil water content, surface (molecular and ion-electrostatic) forces of the solid phase bind water molecules and prevent them from hydrating ions and dissolving electrolyte salts in the soil solution; as a result, electrical conductivity and osmotic pressure values approach zero in this case. With an increase in the water content, water molecules escape gradually from the energy field of surface forces, and their activity (chemical potential) and dissolving capacity also increase. This results in the expected growth of the electrical conductivity and osmotic pressure of the equilibrium solution extracted from the soil. The maximum values of the studied parameters are observed at the water content approximately equal to the maximum molecular water capacity (or to the boundary zone, within which capillary gravitational forces influencing the soil liquid phase become prevailing over the surface interphase interaction forces). The further increase in the soil water content lowers the electrical conductivity and osmotic pressure of equilibrium solution because of dilution of the fixed mass of electrolyte salts. For quantitative description of the revealed functional dependence, we suggest an empirical mathematical model in the form of modified equation of lognormal distribution.

Keywords: soil solution, solid and liquid phases, interphase interactions, concentration, activity, thermodynamic potential, dispersion, modeling

DOI: 10.1134/S1064229318120128

INTRODUCTION

Interaction between the solution and the solid phase in soils controls the composition and concentration of the former via a diverse set of chemical, physical, physicochemical and biological processes operating in a soil as an open, polycomponent, polydisperse bio-abiotic system. The humus-clayey, or more precisely, colloidal-disperse complex of soil (CDC) plays the leading part in this interaction, as it represents the most active portion of the soil solid phase with the high potential surface energy [15, 29]. Despite the evident influence of surface interphase interactions on soil solutions, soil science is mainly focused on the study of substantive composition and chemical reactions, including ion-exchange processes, actually apart from the solid-phase components and upon strong dilution with distilled water, i.e., in such proportions with dry soil, which are not met in nature in consolidated porous media [8, 15, 21, 30, 42]. Few studies deal with the analysis of actual soil solutions by extracting them with gravitational or vacuum lysimeters, membrane presses or centrifuges, by replacement with other liquids, or using in situ measurements, i.e., conductometry, potentiometry, and ion-selective electrodes [4–7, 10, 12, 14, 16–18, 20, 24, 26, 36, 37, 39, 41, 47, 49]. These studies often reveal the dependence between the effective concentration (activity), electrical conductivity (EC), osmotic pressure and other properties of soil solution and the soil water content, or, in essence, the solid : liquid soil phases ratio [1, 6, 9, 10, 16, 17, 19, 23, 26, 39]. However, information on the king of this dependence is ambiguous.

A number of researchers point to the rising electrolyte concentration, EC, and osmotic pressure in the pore solution upon a decrease in the water content or thermodynamic potential (capillary-sorption pressure) of soil moisture [12, 14–16, 18, 24, 40]. This increase is

usually observed upon the use of gravitational or vacuum lysimeters (capillary-sorption pressure ranging from 0 to –1 atm), i.e., upon the transition from gravitational to capillary moisture; it is related to the fractionation of soil solution by the pores of different sizes or, in essence, to the phenomenon of hydrodynamic dispersion, upon which large open pores contain the solution of lower concentration as compared to fine or closed pores, in which the proximity of solid-phase source and a longer time of equilibrium solution state favor its enrichment with ions [12, 14, 34]. In our opinion, this is not the only, and possibly, not the principal explanation, as it artificially represents the soils as a set of incoherent capillaries of different sizes, each filled with electrolyte of its own concentration. The alternative lies in the routine law of dilution/concentration of soil solution upon an increase/decrease of the water content, which was first formulated by Campbell for the osmotic pressure (potential) [40]:

$$P_{os} = P_{os}^0 W_s W, \quad (1)$$

where P_{os}, P_{os}^0 (kPa) is the osmotic pressure of soil solution at the water content W (wt %) and in the saturation condition W_s (%) (the total water capacity), when all pores are filled with the liquid phase, respectively. Linear ratios $P_{os}^0 = 36EC^0$, where EC^0 (dSm/m) is the EC of soil solution upon the total water capacity; $P_{os}^0 = C_0RT$, where C_0 (mol/L) is the concentration of osmotically active substances upon soil saturation with water; R (J/(mol K)) is the universal gas constant; and T (K) is the absolute temperature, which are valid for dilute solutions, link indices of osmotic pressure, effective concentration, and EC and attest to the universal character of Eq. (1) for all of them [3, 40]. On soil desiccation (concentration of solution), Eq. (1) will be evidently valid up to a certain critical moisture, upon which the solubility equilibrium is achieved for the predominating ion components, after which the concentration and osmotic pressure will stabilize in the above-sediment solution. This fits completely the theoretical ideas about the solid–liquid phase interaction in soil discussed in [15] assuming only the hyperbolic instead of linear dependence (inverse instead of direct proportionality) between concentration and moisture according to Eq. (1). The idea about dilution/concentration on increasing/decreasing moisture as a factor of symbatic dynamics of concentration and osmotic pressure in soil solution was also suggested in [9].

However, there is a no less number of works in soil science pointing to the opposite relationship between the studied indices and soil moisture, i.e., to their decrease rather than increase upon soil drying. Above all, these are the classical data obtained by Trofimov, Dumanskyi, Dolgov and a number of other researchers generalized in the fundamental work by Rode [23]. These data attest to the presence of a certain category of water bound by surface forces (insolubilizing volume or saltless film), which is almost devoid of dissolved salts, and, therefore, manifests negligibly low values of EC and osmotic pressure, which are typical of deionized water. A decrease in the concentration of ions and EC in solutions that are pressed, centrifuged, or displaced by the nonpolar liquid in fine-dispersed clay minerals, silts, and sediments starting from a certain water content was described in the classical work by Kryukov [17]. Electrical conductivity of the soil proper as a three-phase system also most often manifests the decreasing trend upon the decreasing moisture, which forms the basis for conductometric methods of moisture assessment in soils, sediments, and other porous fine-grained materials [6, 19, 20, 34, 39, 43].

Finally, very scarce works point to the possible existence of a complicated nonlinear dependence between the studied properties of soil solution and the mass portion of water as a function with an extremum (maximum) [1, 9, 10, 26]. In our previous work, we identified such a relationship for the EC in equilibrium solutions in soddy-podzolic soils, successively extracted by centrifuging in a wide range of capillary-sorption pressure of the soil water (0—1000 kPa, pF = 4).

The present research is aimed at the theoretical substantiation and experimental study of such relationships not only for EC but also for osmotic pressure in the equilibrium solutions of soils differing in their genesis and grain-size distribution; we also attempt to describe them quantitatively using the universal mathematical model.

OBJECTS AND METHODS

The soil samples differing in their genesis, particle-size distribution, salinization degree, and structural state were the objects of experimental research. Soddy-podzolic sandy loamy, silt loamy, and clay loamy soils of different cultivation degrees (Ap horizon) (Eutric Albic Reisols (Loamic, Aric, Cutanic, Ochric)) from Moscow oblast (the Chashnikovo test plot of Moscow State University); gray forest silt loamy soil (A1 horizon) (Eutric Retisol (Loamic, Cutanic, Humic)) from Tula oblast; leached silt loamy chernozem (Ap horizon) (Luvic Chernic Phaeozem (Loamic; Aric, Pachic)) from Lipetsk oblast; alluvial soddy sandy loamy soil (A1 horizon) (Eutric Fluvisol (Arenic, Humic)) from Amur oblast; peat bog lowland soil (T horizon) (Eutric Hemic Histosol) from Tver oblast (the Western Dvina test plot belonging to the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences); and arid soils from the Astrakhan lowland— brown semiarid soil (Calcaric Endosalic Cambisol (Loamic, Ochric)), A1 horizon, sandy loam, $EC_{1:1}$ = 3.7 dS/m, BC horizon, $EC_{1:1}$ = 18.7 dS/m; meadow-chernozemic solonchak (Mollic Stagnic Solonchak (Loamic, Humic)), B_{Ca} horizon, heavy loam (clay), $EC_{1:1}$ = 11.7 dS/m, BC horizon, silt loam,

$EC_{1:1}$ = 30.0 dS/m—were examined.The $EC_{1:1}$ index is the soil water EC in dilution 1 : 1 (dry soil : water) pointing to the degree of soil salinization in the range from nonsaline (<4 dS/m) to strongly saline (16–33 dS/m) soils. Gradation data according to [3] were developed for the EC of water extracts from a water-saturated paste; they were used as tentative. Actually, due to dilution effect, the salinization degree may be somewhat higher for soils with the total water capacity lower than 100% of the water mass portion. However, the surface conductivity of the paste partially compensates for this increase. For most of the studied soils, experiments were performed with loose samples sieved through a 1 mm screen; for soddy-podzolic soils, with undisturbed cylindrical monolith samples of 3 cm in height and 3 cm in diameter.

The equilibrium soil solutions were obtained, and soil water retention curves (WRCs) were found using the original author's method of equilibrium centrifuging on CUM and CLN-16 (Russia) centrifuges with angular rotors and the maximal speed up to 8000–12000 rpm [25, 45]. Samples were placed in bottom-perforated metal or plastic holders and installed in 100-mL centrifuge test tubes on rests for collecting the soil solution separated by centrifuging. After each centrifuging stage at a certain rotation velocity, the soil samples were weighed on an analytical balance ACCULAB-620 (USA) with the accuracy up to 0.001 g, and the separated solution was tested for EC using DIST-WP4 (HANNA Instruments) conductometer with an accuracy 0.01 dS/m. A special electrode nozzle was used for measurements in tiny volume of liquid. An aliquot of centrifuged liquid (1 mL) was sampled with a medicine syringe with a thin needle and transferred to a mini cuvette of the same volume to perform conductometric measurements. Such a small constant volume was used to standardize the measurement conditions, since at the last centrifuging stages, the soil solution output was small and rarely exceeded 2 mL. Initially, soil samples were saturated for 24 h with distilled water with the EC close to zero (or, more precisely, undetectable with a conductometer of the given accuracy class) to reach the total water capacity. Using the data on changes in the sample mass at each centrifuging stage and the centrifuge rotation velocity, we calculated the equilibrium water content and the capillary-sorption potential of soil water according to [45]. All analyses were performed in four replicates.

The osmotic pressure (potential) of soil solution was calculated as the algebraic difference between the total water potential and the capillary-sorption water potential at the same water content of the samples in agreement with the theory of additivity of thermodynamic potentials of soil water [9, 31, 40]. To assess the total potential, we used the cryoscopic method in our modification [27] with an automated registration of freezing curves by programmed hydrothermal sensors DS1923 (USA). The WRC and the water content–total water potential relationship were approximated using the van Genuchten and Campbell models, as well as the fundamental ion-electrostatic model of disjoining pressure (the modified Derjaguin equation) [25, 33, 34].

To approximate the experimental data with nonlinear mathematical models, we used Sigma Plot 2001 program with the incorporated algorithm of nonlinear regression Regression Wizard [2]. Along with the model parameter values, the program estimated automatically their variation in the form of relevant standard deviations, the statistical significance (difference from zero), as well as the major statistical indices, i.e., the reliability value (R^2) and standard approximation error (s).

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the experimental data on the absolute values of capillary-sorption (WRC), total, and osmotic potentials of soil water depending on its mass portion (water content) in soils of different textures and salinities from the Astrakhan Lowland. The total water potential curves were approximated by the Campbell function [40] (curve *1*) and the WRC (according to van Genuchten) function [34] (curve *2*) and by the disjoining pressure model [25, 33] (curve *3*). The osmotic potential (pressure) curve was built according to the difference between the total and capillary-sorption potentials calculated for the fixed moisture values using the mentioned functions. Thus obtained dependence $P_{os}(W)$ shows a complex shape of extremum (maximum) function in the area of low and medium water content (10–20%). This variation depends on the dispersion and salinization degree of the samples. At first, with the decreasing moisture, the osmotic pressure grows rather gently and gradually. After the extremum having been achieved, it sharply decreases within a narrow range (4–7(10)%) of moisture. The described shape of this curve $P_{os}(W)$ is most distinctly pronounced in the inserts to Fig. 1, in which the semilogarithmic scale of pressure (potential) on the vertical axis is changed to an ordinary scale.

In this case, the routine van Genuchten model is used for the WRC description [34]. Despite a close (in general) correlation with experimental data (R^2 = 0.98–0.99), s = 0.3–1.2%), the model may predict erroneously in the area of noncapillary soil moisture bound by surface forces in approaching the so-called residual moisture parameter (Θ_r) in the van Genuchten function, which is often taken as the maximal air-dry moisture or "insolubilizing volume (IV) [34]. The mathematical van Genuchten function becomes indefinite in this point. The parameter (Θ_r) proper was reproduced with a big error upon data approximation (the relative error ranging from 13 to 60%) with the significance level below permissible values p = 0.15–0.17; for the strongly saline sample from the BC hori-

zon of solonchak (Fig. 1d), this parameter did not differ from zero.

Therefore, to our mind, $P_{os}(W)$ calculation appears to be more accurate upon the approximation of a part of the WRC by the fundamental ion-electrostatic model of disjoining pressure [25, 33], which gives us a straight line in semilogarithmic coordinates in the area of film and adsorbed moisture. This line crosses the total potential curve at a lower moisture as compared to the van Genuchten model, the latter infinitely sharply rising upward in the water content area close to Θ_r, which contradicts the physical essence of capillary-sorption pressure of soil moisture [33]. The alternative model suggests a more accurate description in the considered area ($0.997 \le R^2 \le 0.999$) as compared to the van Genuchten function in case of a twofold reduction in the number of parameters (two instead of four) and their statistical reliability at the significance level $p < 0.001$. Figure 2 shows the result of improved estimation of $P_{os}(W)$ obtained from the difference between the total potential and the capillary-sorption pressure estimated using the ion-electrostatic model. The general type of relationship is the same; however, the position of the extremum point and the moisture of the close to zero osmotic pressure move left along the water content axis, i.e., their values decrease.

The results obtained by us in this study, as well as the analogous assessment of $P_{os}(W)$ described in previous paper [9] appear to be indirect estimates, because for a small number of experimental points, the total water potential and the WRC largely depend on the models used for their approximation and interpolation. This fact undoubtedly makes thus obtained results less valuable in scientific respect and gives way to criticism. Thus, Sudnitsyn [31] provides numerous experimental data proving total discrepancy between WRCs and the total thermodynamic potential in the area of medium and low moisture, which gives him reasons to criticize the conclusion about P_{os} tending to zero upon soil drying and their determination via joining the parts obtained by the sorption (total potential) and tensiometric (capillary pressure) methods as suggested in [9]. Later, it was concluded that the applicability of calculations according to Voronin only for nonsaline soils with a relatively small osmotic component of the total thermodynamic (chemical) potential of soil water [34]. However, in our opinion, this idea radically contradicts both the fundamental essence of the Voronin method and the experimental data [9] it is based on, because these data, as well as our results (Fig. 1, 2) obtained for various samples, including strongly saline soils attest to the same dependence $P_{os}(W)$ tending to zero in the area of the low moisture water content. What is the matter? Most likely, the reason is in the methods of sample preparation (soil moistening) and water removal. In paper [31], the tensiometric section might have been obtained from the samples of one kind, whereas the total potential (psy-

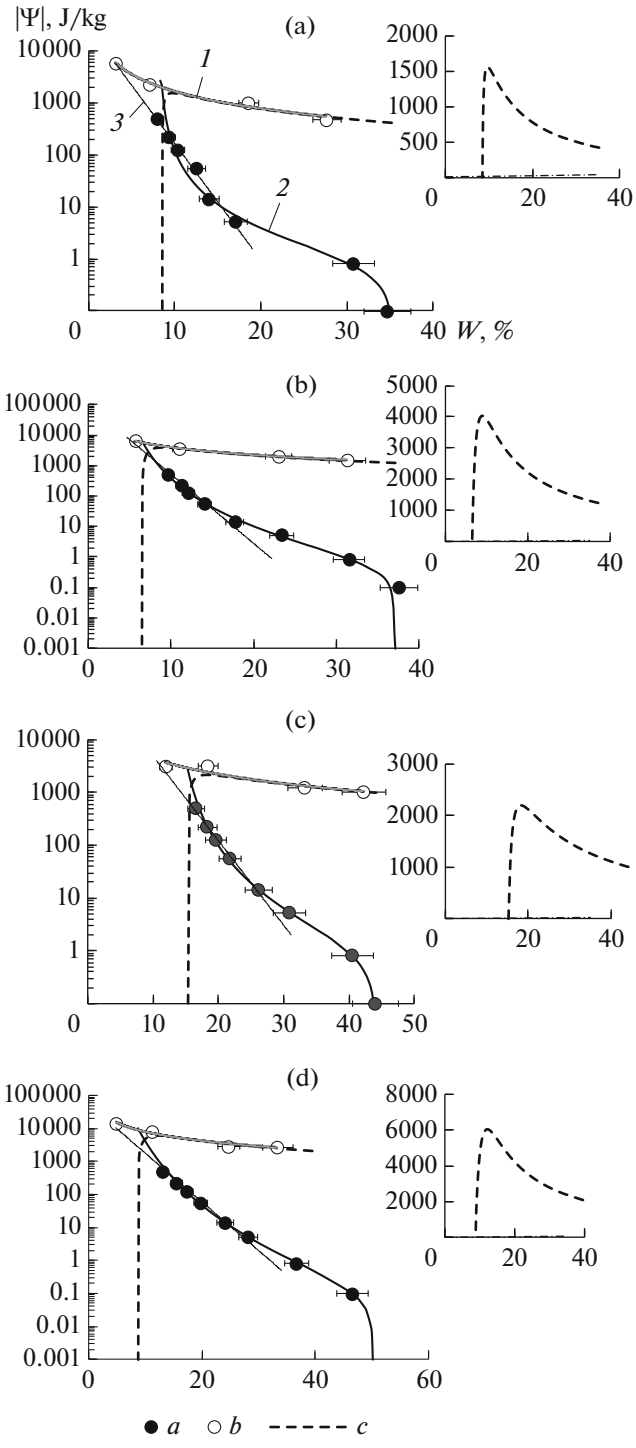


Fig. 1. Dependences of absolute values of the (a) capillary-sorption and (b) total water potentials and (c) osmotic pressure in the liquid phase on the mass percent of water in soil: (*1*, *2*, *3*) data approximation by hydrophysical models; insert graphs show $P_{os}(W)$ function transformed to an ordinary scale. Soils: (a and b) brown semidesert soil, A1 and BC horizons, respectively; (c and d) solonchak, B_{Ca} and BC horizons, respectively. See the text for remaining designations and explanations.

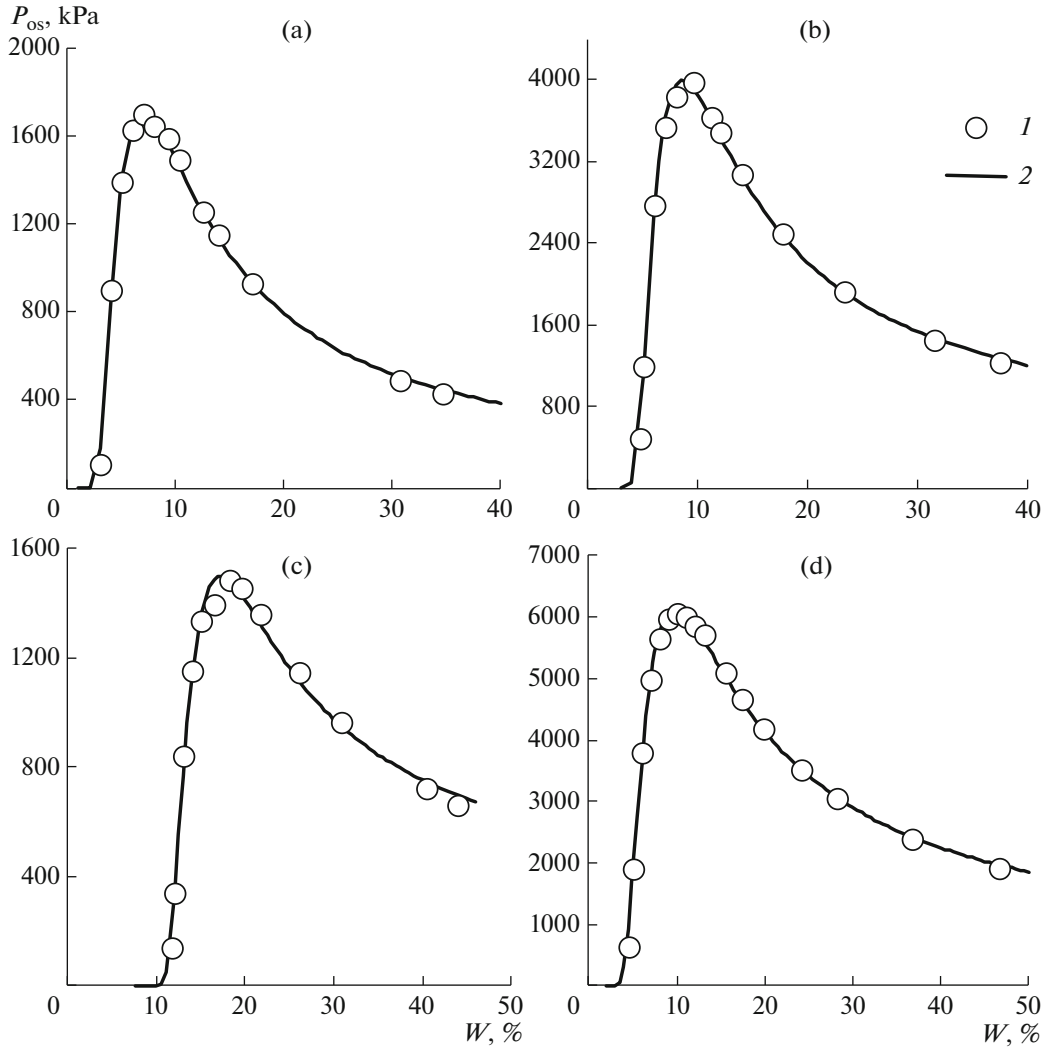


Fig. 2. Dependence of the osmotic pressure of soil water on the soil water content and its simulation. Soils: (a, b, c, and d) see Fig. 1; (*1*) calculated and experimental data (calculation of the difference between the total and capillary-sorption water potentials), (*2*) model (2).

chrometry and cryoscopy) was measured on the samples of another kind prepared either by adding the calculated amount of water to the air-dry soil or by air drying (or thermostat drying) of the samples initially wetted to the total water capacity. In this case, the data discrepancy is expected, since salts are partially removed with water solution upon tensiometry (pressing or centrifuging) and remain in the soil upon the determination of the total water potential by cryoscopy and psychrometry to create an additional air-dry solid phase on sample drying. This increases the water retention significantly in the area of low moisture, which was proved experimentally [28]. If to measure the total and capillary sorption potentials simultaneously using the same samples, no discrepancies arise, and the $P_{os}(W)$ curve estimated from their difference regularly tends to zero upon soil drying in the area of low values of the soil water content.

The direct estimation of EC of solution extracted from soil may serve as an independent evidence. The EC value is related to the concentration of electrolytes and osmotic pressure, which convinces us in versatility of nonlinear dependences of P_{os} on the water content (Fig. 3). This parameter also shows the initial rise of EC in the measured equilibrium centrifuged solution in the course of decreasing soil water content; further, after the maximum is passed, in the area of medium and low water content (about 35–30% of total water capacity, or one-third of the possible water content in consolidated soil). It manifests a rather sharp decrease down to conventionally zero values (undetectable by the HI DIST-WP4 device used this study). This does not mean that EC reaches an absolute zero, as even the water completely devoid of dissolved salts is capable of conducting electric current. However, the zero instrument reading with 0.01 dS/m resolution proves that

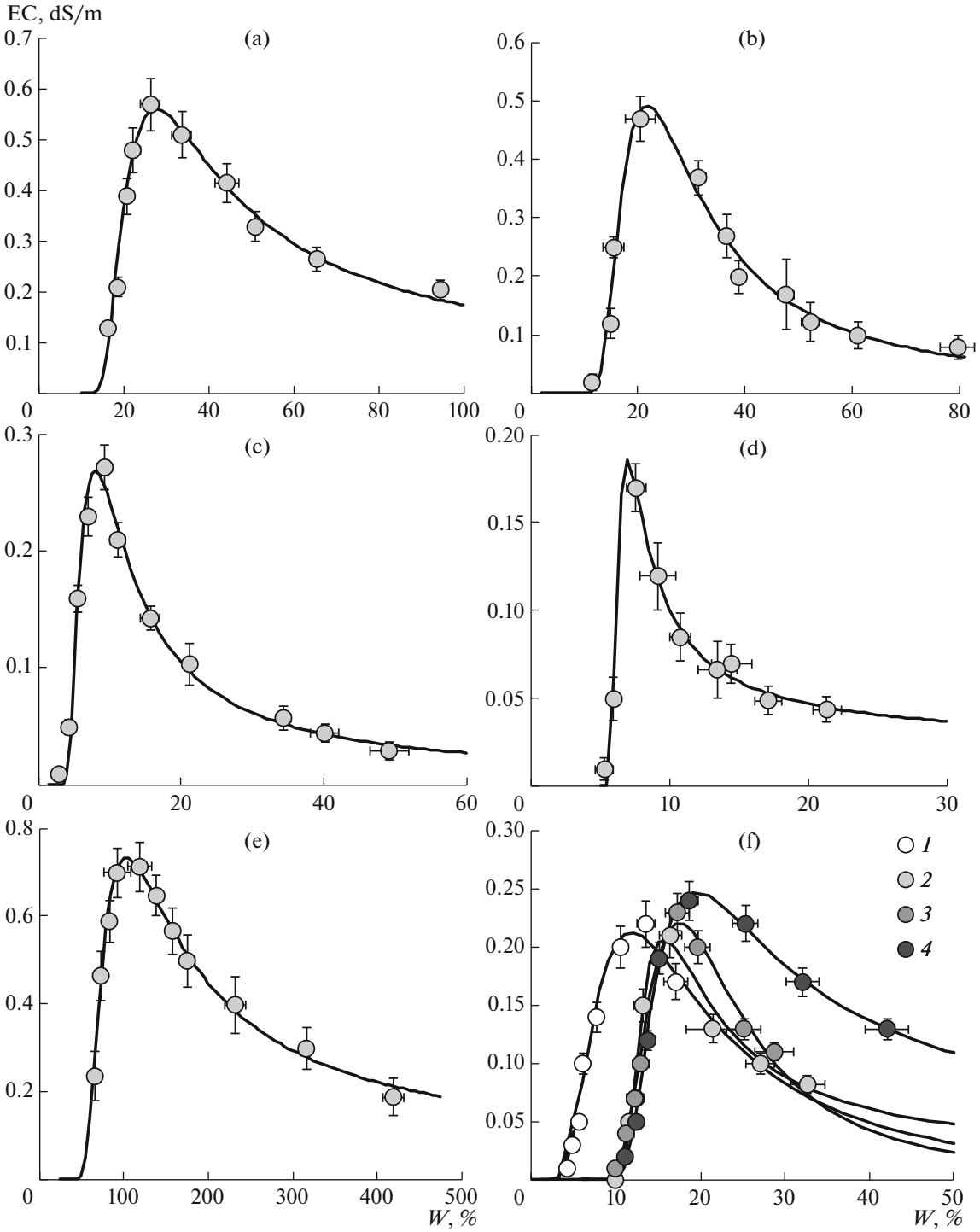


Fig. 3. Dependence of the EC of equilibrium soil solutions on the soil water content. Soils: (a) chernozem; (b) gray forest; (c) and (f) soddy-podzolic; (d) alluvial soddy; (e) peat bog; (f) textures of soddy-podzolic soils: (*1*) sandy loam, (*2*) and (*3*) silty loam, and (*4*) clay loam. Round symbols designate experimental data, lines stand for model (2).

this water does not differ from distilled water in the content of salts (ions). This experimental fact confirms the result of previous indirect assessment of osmotic pressure tending to zero in soil solutions in the area of low soil water content. It also agrees completely with the direct measurement of parameters of equilibrium soil solutions extracted from fine-dispersed systems by pressing, centrifuging, or displacement by other liquids; in particular, it is in line with a tendency to a decrease in the concentration of electrolytes (the

total content of ions) upon the decreasing water content starting from some critical water content in such systems [10, 17].

A comparison of our experimental results with published data [1, 9, 10, 17, 26] allows us to conclude on the universal character of the dependence of active concentration, osmotic pressure, and EC in equilibrium soil solutions on the soil water content. This dependence takes the form of nonlinear function with the extremum as shown in Figs. 1–3. Let us turn to the theoretical explanation of such a relationship and to its mathematical simulation. Historically, the first attempt to give a fundamental interpretation of $P_{os}(W)$ dependence was made in [9] proceeding from two effects, i.e., the soil solution concentration in the area of relatively high water content and the "insolubilizing volume" at the low water content close to the maximum hygroscopic moisture [9]. Being unaware of this work earlier, we proposed a similar in essence explanation based on the concept of competing interphase interactions in soil physical systems [25, 26]. Let us consider it in detail and let us try to substantiate it proceeding from the available experimental data.

Let some initial equilibrium concentration of electrolytes and the relevant osmotic pressure and EC exist under the condition of saturation or oversaturation (paste, suspension). If this water occurs in the free state, i.e., outside the field of soil surface forces, and shows an ordinary solvency, the decreasing content of this kind of water in soil should result in a gradual growth of active concentration, EC, and osmotic pressure in the equilibrium solution according to the Campbell law (1). Approximation of the ascending sections of the curves $P_{os}(W)$ and EC(W) by the exponential model $y = aW^{-b}$, where y is the analyzed parameter of soil solution, and a and b are empirical constants, appears to be a good evidence in favor of concentration/dilution mechanism rather than the alternative hypotheses of dynamics of the studied soil solution characteristics (e.g., the hypotheses of solution "fractionation" by pores or hydrodynamic dispersion). The model manifests high determination coefficients ($R^2 = 0.98–0.99$) for the statistically reliable parameters at the significance level $p < 0.01$, with the b parameter varying from 0.77 (soddy-podzolic clay loamy soil) to 1.44 (gray forest silt loamy soil); it does not differ statistically significantly from 1 at $p = 0.05$ (which is usually applied in soil science) irrespectively of the analyzed property (either osmotic pressure P_{os} or electrical conductivity EC). This fact indicates that the suggested model is actually equivalent to Eq. (1).

The rise in active concentration should continue up to reaching the solubility equilibrium for the ion predominating in the soil solution, after which the active concentration (the osmotic pressure and EC) might be stabilized at some maximal levels. If it had been so, we would have derived unambiguous curves of the rise in these parameters with decreasing soil water content, or, at least, their rise up to the maximum, after which no changes should take place. However, in fact, the experiments point to the permanent opposite trend of decreasing concentration, osmotic pressure, and EC in the equilibrium solutions starting from some critical water content upon the soil drying. This trend may be explained by the fact that the residual water falls into the field of surface forces of the fine-dispersed solid phase, including apparently the precipitated salts that have reached the solubility equilibrium on concentrating; in this case, the competition for water molecules begins between the soil surface and the solution ions. An alternative hypothesis arising from the nonlinearity of EC function and decreasing its values at high (3–10 M) concentrations of electrolytes [38] is, on one hand, unlikely for most of soils (except for solonchaks); and, on the other hand, it may be reduced to our explanation, if to take precipitating salts for the analogue of the soil solid phase. Finally, when the energy of molecular interactions between the solvent (water) and the solid phase exceeds their energy of interaction with free ions of the liquid phase, the bound water may evidently loose its dissolving capacity for salts [23]. All direct measurements of the liquid extracted from soil [17, 23, 26] (Fig. 3), as well as indirect assessments [9] (Figs. 1 and 2) permit us to conclude that this water contains virtually no salts and does not represent a concentrated solution with the low EC as stated in [38].

In the classical dispute [23] on the mechanisms of water-retention capacity of soils (surface hydration or cation hydration), this effect, in turn, markedly points to the fact that the interaction energy between the ions of double electric layer (DEL) and the surface of colloidal-disperse complex (CDC) of soil is higher than the energy of their hydration. Therefore, the CDC surface contributes most of all to the water-retention capacity of soils, with the diffusive layer of DEL being its peculiar continuation (bifurcation) in the disperse medium (Fig. 4). This scheme shows the bonds between DEL ions and adsorbed counter-ions on the surface (and, probably, counter ions of the sediment precipitated upon concentration of salts in the soil solution) as "springs" that may stretch as affected by heat motion without breaking unlike ions in the free solution outside DEL. In this scheme, DEL cations represent in essence the same surface charges, only at some distance from the surface. They spend the bulk of free energy for the strong electrical (Coulomb) interaction with the surface. The more energy, the closer to the surface (this is shown in darkening tone in Fig. 4). Only the residual energy is spent for the interaction with the polar water molecules (hydration). Therefore, being removed (pressed by the membrane press at the pressure of thousands kPa, or centrifuged), the soil water contains almost no dissolved electrolytes, and the soil does not acquire any electrical charge, as it would have been if DEL cations had been bound to water (hydrated) stronger than to the surface.

Hence, we regard the attempts to calculate quantitatively the input of exchange cations to the water retention according to the cation exchange capacity and the degree of cation hydration [31, 32] as senseless, because DEL cations and adsorbed exchangeable ions in disperse systems do not possess that amount of hydration energy and that degree of ionization as determined for free solutions, which was correctly stated by Rode [23]. Outside the diffusive layer of DEL (conventionally, because the exponential decrease in the concentration of ions in the diffusive layer suggests that there are no distinct boundaries in this system) ions of the free pore solution are completely hydrated (blank symbols in Fig. 4). However, they do not contribute to the increase in the water-retention capacity of the soil solid phase (capillary-sorption pressure) and only add to the osmotic component in the total water potential. Finally, the phenomena of recharging colloids, as well as the points of charge inversion and "zero potential" that can be reached not only in chemical and physicochemical experiments [15, 30, 42], but also in nature, mean the absolute loss of water-retention capacity in case the soil water would have been bound only by exchangeable ions, which is not actually observed.

The above-discussed scheme explains the experimental results and points to the complicated processes of solid–liquid interaction in soils, in particular, to the mobile boundaries between the soil water (solution) categories distinguished according to the force of bonding with the solid-phase matrix [25, 26]. Classical ideas giving the priority role to dispersion and structure of solid-phase soil components should be apparently improved because the capacity of soil particles to bind water, and, hence, the boundary of firmly bound water category ("insolubilizing volume") are controlled also by the composition and concentration of the liquid phase (i.e., by parameters of the soil solution proper) along with the mentioned factors. Therefore, for the same particle-size distribution (texture) of soil, the IV value turns out to be higher for saline soils or upon using the concentrated solutions instead of fresh water. The same is also true for changing solution composition, i.e., when single-charged cations are replaced by bi- or tri-charged cations. These, allegedly insignificant (from the viewpoint of capillary model of water retention that predominates in soil science) changes lead (according to the alternative ion-electrostatic model) to shrinking DEL and, respectively, to reducing water volume bound by surface forces (film and adsorbed water). The dotted line in Fig. 4 marking the conventional boundary of this category of bound water will move left in this case, closer to the surface of colloidal-disperse complex.

The results obtained in the work in the form of universal functional dependence between soil solution characteristics and moisture are important for all major divisions of soil science. For soil physics, these are the patterns of thermodynamic potentials as

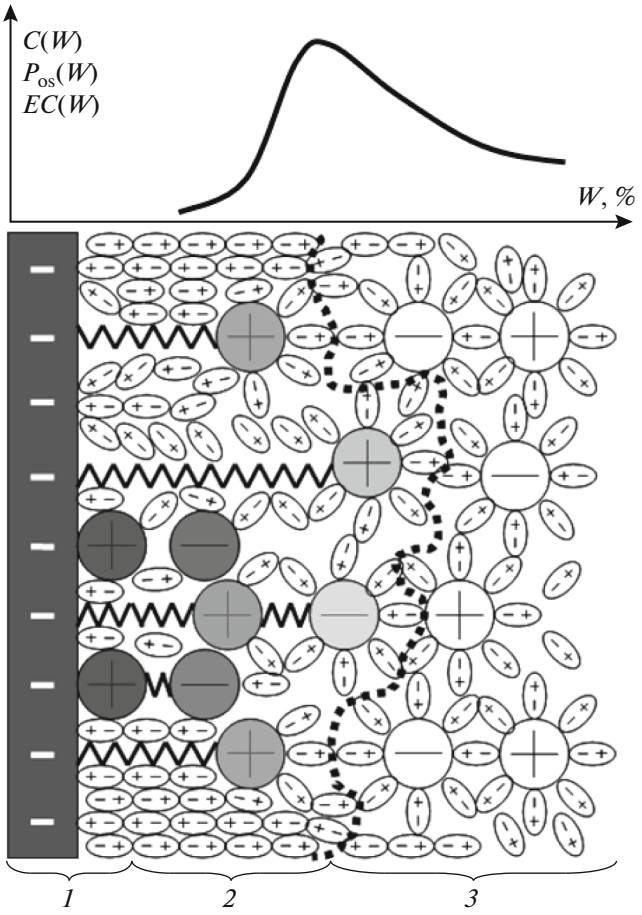


Fig. 4. Surface-energy mechanism of the formation of water-retention capacity and concentration of solution in soil: (*1*) a flat surface of solid negatively charged particle of the colloidal disperse complex and the adsorption layer; (*2*) diffusive layer of DEL with branched conventional boundary of acting surface forces (dotted line), to which the maximum on the curves of concentration (C), osmotic pressure (P_{os}), and electrical conductivity (EC) as dependent on the water content is allocated (top of the figure); and (*3*) free soil solution; see the text for other designations and explanations.

dependent on the soil water content, the idea about the mobile boundaries between different kinds (categories) of soil water, and simple techniques of their quantitative estimation according to the experimental curves EC(W) or other moisture functions (active concentration, osmotic pressure). There are grounds to consider the extremum (maximum) moisture in these curves to be equal to the maximum molecular water capacity (MMWC) of soil or to the conventional boundary of active impact of surface forces (molecular and ion electrostatic) from the solid-phase matrix on the soil solution [26]. In its turn, water with conventionally zero EC (concentration or pressure) in the equilibrium soil solution corresponds to insolubilizing volume value, or to the maximum adsorption water capacity according to Voronin [34], which character-

izes firmly bound water [26]. In this case, the simple, quick, accurate, and cheap method [26] of assessing the indicated soil-hydrological constants from EC(W) curves along with the determination of capillary-sorption potential and osmotic pressure of soil water almost through the entire natural diapason of moisture variation may be used successfully instead of well-known labor-consuming techniques, which are often devoid of fundamental substantiation, e.g., the estimation of MMWC according to Lebedev, Kolyasev, or Dolgov-Matskevich, or the estimation of insolubilizing volume using standard osmotic solutions and soil pastes [18, 22, 23, 34]. The proposed approach estimates the actual thermodynamic balance and the limits of surface forces operation in the disperse three-phase system with the inherent composition and concentration of soil solution. In case of using some universal solutions with standard concentrations of electrolytes, the insolubilizing volume (maximum water adsorption capacity) values will differ from the actually observed values due to inevitable competition between water retention by fine-dispersed particles and new osmotically active components of the liquid phase in accordance with the scheme shown in Fig. 4.

In chemistry and physical chemistry of soils, knowing the dependence of the active concentration and related properties of soil solutions in dependence on the water content permits more precise prediction of ion exchange, sorption, and other chemical reactions in soil, as well as other processes, for which the equilibrium thermodynamic constants are known. Determination of equilibrium constants in laboratory appears to be allowable for strong dilutions (which are atypical for soils); however, to predict the processes that go actually in consolidated three-phase chemical systems (reactors) with variable moisture, one should replace actual active concentrations by the chemical equations with these constants, whereas the former may vary 3–10 times due to the concentrating/diluting effect only for the same amount of electrolytes as is seen in Figs. 1–3. Concentration variation on the descending branch from MMWC to IV can reach several dozen times. Meanwhile, as far as we know, these effects being the direct consequence of the complex nonlinear relationship between the active concentration of solubles and moisture are not taken into consideration in the present-day computer models of energy and mass exchange in distributed reactive porous media [34].

For agrochemistry and soil biology, the significance of this dependence consists of the possibility to determine more precisely and optimize the conditions of mineral nutrition of plants, as well as the boundaries of soil microbiota functioning. For instance, the root consumption at the soil moisture close to MMWC may be apparently no less productive than for the higher content of moisture, since the increment in nutrition concentration in the liquid phase in the form of soluble salts compensates for the mitigating flow of liquid proper. The technique of introducing the mineral nutrition elements and plant protectants to the rhizosphere in the form of hydrogel compositions [46] is also fundamentally substantiated. For gels, the dependence between the active concentration of ions and the moisture is pronounced in a wide rather than narrow (MMWC) zone that shows almost permanent maximal concentrations lowering at rising moisture only with the gradual transition of gel to sol (physical dilution) [17]. Unlike capillary-porous bodies, gels represent two-phase systems always saturated with water, which fills the entire possible volume, which probably ensures the maximal contact and mass exchange with the solid phase and the known stability in the composition and content of equilibrium solution upon shrinkage and swelling.

Consideration of the results obtained in the agrochemical assessment of salinization shows that soil drying to the MMWC upon the formal absence of salinization ($EC_{1:1} < 4$ dS/m) may lead, according to the observed regularities in EC(W) and $P_{os}(W)$ curves, to EC up to 12 dS/m and higher in the equilibrium solution, i.e., to the values typical of solonchaks exerting substantial suppression of vegetation [13]. At the same time, the permanent presence of a certain amount (dependent on the colloidal complex dispersion and the ionic strength of free solution) of nearly distilled water appears to be no less important positive ecological factor. For the higher plants with the root potential rarely exceeding 15–20 atm (1500–200 J/kg) this water will be virtually unavailable despite the fact that it may reach 20–30% and more of the total amount of water, e.g., in clayey Vertisols of Tunisia [25]. For soil microflora with the absolute water potential up to 3–90 kJ/kg at spore germination and higher (actinomycetes), this medium (even solonchaks) will be quite suitable for life and reproduction according to [13]. The above-discussed list (far from being exhaustive) of possible application of the universal dependence of the soil solution characteristics from moisture obtained in our study testifies to its importance for the soil science. The use of this relationship is simplified significantly, if it is quantitatively formalized by an adequate mathematical model. Therefore, the final part of our study will be aimed at deriving such a model.

Thermodynamic moisture potential, as well as chemical potential of a component of soil solution are the fundamental logarithmic functions of the activities. Formally, for the normal (Gauss–Laplace) distribution of potentials in the multicomponent thermodynamic system, we may speak about the lognormal distribution of active concentrations (mass or mol shares) of all its components. In fact, in the recent decades, soil science has presented a number of successful physicochemical models of structural-functional properties and processes that follow lognormal distribution [11, 34, 35, 44, 48]. The modified law of lognormal distribution [11] as applied to the quantitative descrip-

Table 1. Results of *P*os(*W*) and EC(*W*) data approximation by model (2) and their statistical processing

Sample	Model (2) parameters and statistics					
	a	*b*	MMWC	IV	R^2	*s*
Osmotic pressure (Fig. 2)						
a	1772 ± 19	0.34 ± 0.02	6.99 ± 0.10	0.63 ± 0.10	0.996	38.1
b	3997 ± 47	0.44 ± 0.02	8.60 ± 0.11	1.81 ± 0.14	0.995	91.5
v	1501 ± 27	0.59 ± 0.04	17.24 ± 0.25	7.39 ± 0.43	0.988	54.7
d	6126 ± 46	0.39 ± 0.02	9.79 ± 0.10	1.14 ± 0.11	0.997	111.1
Electrical conductivity (Fig. 3)						
a	0.56 ± 0.02	0.43 ± 0.06	21.64 ± 0.73	6.65 ± 1.31	0.974	0.03
b	0.49 ± 0.03	0.32 ± 0.06	21.70 ± 0.72	4.94 ± 1.59	0.966	0.03
c	0.27 ± 0.04	0.36 ± 0.08	7.95 ± 0.93	1.49 ± 0.65	0.953	0.05
d	0.19 ± 0.02	0.61 ± 0.04	6.93 ± 0.19	4.87 ± 0.27	0.988	0.01
e	0.73 ± 0.01	0.43 ± 0.03	103.69 ± 1.71	22.53 ± 3.07	0.989	0.02
f-1	0.21 ± 0.01	0.17 ± 0.09	11.78 ± 0.66	0.19 ± 0.07	0.981	0.01
f-2	0.21 ± 0.01	0.49 ± 0.10	15.62 ± 0.53	7.22 ± 1.28	0.967	0.02
f-3	0.22 ± 0.01	0.25 ± 0.09	17.42 ± 0.54	3.09 ± 1.81	0.988	0.01
f-4	0.25 ± 0.01	0.47 ± 0.06	19.39 ± 0.37	5.72 ± 0.75	0.994	0.01

For sample designations, see Figure captions to Figs. 2 and 3.

tion of relationship between the concentration properties of solution and the soil water content results in the following model:

$$F = a\exp\left[-\left(\frac{\ln\left(\frac{W+b}{\mathrm{MMWC}+b}\right)}{b\ln\left(\frac{W}{\mathrm{IV}}\right)}\right)^2\right]. \qquad (2)$$

Here, F stands for the simulated function of EC(W) and $P_{os}(W)$ represented as the probability density of mass share (active concentration) of electrolytes in the soil with variable moisture; a is the maximal value of this function in the extremum point at W = MMWC; and b is the empirical parameter controlling the width of the distribution peak. Numerator in the under exponential function shows the mathematical expectation of average in the surrounding of b median (the geometric mean) with the central value of MMWC (the distribution peak coordinate along the water content axis); denominator stands for variance with the limit minimal value W = IV. Function (2) is evidently defined at semi-infinite section IV < W < ∞, which fits the lognormally distributed value [11] and the physical essence of soil moisture as any solid/liquid mass ratio on dilution/concentration; in doing so, the standardized probability density $f = F/a$ changes from zero to one, i.e., remains a finite value not exceeding 1 according to its physical sense.

The results of data approximation by model (2) are shown as curves (Figs. 2 and 3) with model and statistical parameters listed in the Table 1. Both the visual analysis of the graphs and the statistical data attest to the adequacy of the proposed model to experimental data for all soil samples and studied parameters EC(W) and $P_{os}(W)$. The values of approximation reliability R^2 varied from 0.974 to 0.999 for standard errors s = 0.008–0.056 dS/m for EC and s = 38–111 kPa for osmotic pressure, which is substantially lower than the errors of experimental estimation (conductometry) and calculation of these values. Index 100s/a standing for the relative standard approximation error for most of cases does not exceed 3–5%. If relative values normalized according to their maximums (EC/EC^{max} and P_{os}/P_{os}^{max}) are used, parameter a does not differ statistically significantly from 1. Therefore, the initial four-parameter function (2) is reduced to a three-parameter function, with one of the three remaining parameters (MMWC) being set apriori as the maximum abscissa for the studied experimental curves. Mathematically, this reduces the data approximation problem to the search for two remaining parameters (IV and b) and to the specification of the a priory set MMWC value. This makes it possible to find promptly an optimal solution for the description of a very complex nonlinear dependence (Figs. 2 and 3) by, in essence, two-parameter equation for the area IV < W.

Thus, in this study we managed not only to come up with one kind of curves describing the functional relationship between the soil solution parameters and the soil water contents in two radically different experiments and to substantiate it fundamentally but also to propose an adequate mathematical model of the obtained universal function.

CONCLUSIONS

(1) Soil solution is characterized by a universal functional relationship between active concentration, osmotic pressure, and EC values versus mass percent of water in soil in the form of a nonlinear function with an extremum (a peak).

(2) This function shape may be explained by the manifestation of competitive interactions between water molecules and solid phase and ions in the solution at the low water content along with the effects of concentration/dilution soil solution in the area of medium and high water content.

(3) The maximum on the curves (conventionally, the maximum molecular water capacity) fits the upper boundary of surface forces influence on soil solution and its maximum active concentration; the minimal values of concentration, osmotic pressure, and EC (experimentally indistinguishable from zero) are observed in water firmly found by surface forces (a conventional condition of insolubilizing water volume).

(4) To describe the obtained relationship, we suggest the mathematical model in the form of a modified function of lognormal distribution of the studied parameters of solution presented as the probability density of their mass content (active concentration) in the soil with variable water content.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects nos. 16-16-04014 and 17-77-20046). The authors are grateful to E.V. Sokolova, a graduate student of the Soil Science Faculty of Lomonosov Moscow State University for her help in the laboratory experiments.

REFERENCES

1. A. A. Ananyan, "Water crystallization in freezing and frozen rocks," in *Modern Concepts about Related Water in Minerals* (Academy of Sciences of USSR, Moscow, 1963), pp. 59–63.
2. I. S. Belyuchenko, A. V. Smagin, L. B. Popok, and L. E. Popok, *Data Analysis and Mathematical Modeling in Ecology and Nature Management* (Kuban State Agricultural Univ., Krasnodar, 2015) [in Russian].
3. E. Bresler, B. Mc Neal, and D. L. Carter, *Saline and Sodic Soils: Principles–Dynamics–Modeling* (Springer-Verlag, Berlin, 1982; Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987) [in Russian].
4. T. L. Bystritskaya, V. V. Volkova, and V. V. Snakin, *Soil Solutions of Chernozems and Gray Forest Soils* (Nauka, Moscow, 1981) [in Russian].
5. T. L. Bystritskaya, E. Kovach-Lang, and V. V. Snakin, "Soil solutions as the parts of the cycle of chemical elements in the forest-steppe zone of Hungaria," Ekol. Kooperatsiya, No. 3, 58–63 (1984).
6. A. F. Vadyunina, E. V. Shein, A. V. Kirichenko, V. M. Goncharov, and L. P. Kopikova, "Electrical conductivity of saturated and unsaturated soil and pore solutions," Vestn. Mosk. Univ., Ser. 17: Pochvoved., No. 2, 42–49 (1984).
7. E. F. Vedrova and V. M. Korsunov, "Composition of lysimetric waters in soddy-podzolic soils of Western Siberia," Pochvovedenie, No. 6, 49–54 (1985).
8. L. A. Vorob'eva, *Chemical Analysis of Soils* (Moscow State Univ., Moscow, 1998) [in Russian].
9. A. D. Voronin and V. D. Skalaban, "Relationships between full, capillary-sorption, and osmotic potentials of water in soil," Pochvovedenie, No. 12, 121–125 (1978).
10. N. I. Gorbunov and I. G. Tsyurupa, "Heterogenic concentration of a solution isolated from clay minerals and soils," Pochvovedenie, No. 33, 166–171 (1947).
11. E. A. Dmitriev, *Mathematical Statistics in Soil Science* (Moscow State Univ., Moscow, 1995) [in Russian].
12. R. I. Zaitseva, N. G. Minashina, and I. I. Sudnitsyn, "Concentration of sodium chloride solutions in pores of various size," Eurasian Soil Sci. **30**, 284–289 (1997).
13. D. G. Zvyagintsev, G. M. Zenova, E. A. Doroshenko, A. A. Gryadunova, T. A. Gracheva, and I. I. Sudnitsyn, "Actinomycete growth in conditions of low moisture," Biol. Bull. **34**, 242–247 (2007).
14. E. I. Karavanova and E. A. Timofeeva, "Chemical composition of solutions in macro- and micropores in the upper horizons of soils in the Central Forest State Biosphere Reserve," Eurasian Soil Sci. **42**, 1357–1363 (2009).
15. E. I. Karavanova and S. Ya. Trofimov, *Liquid Phase of Soils* (Universitetskaya Kniga, Moscow, 2009) [in Russian].
16. E. I. Karavanova, E. A. Timofeeva, and A. V. Smagin, "Water retention curves and chemical compositions of soil solutions from some soils of the Central Forest State Nature Biosphere Reserve," Moscow Univ. Soil Sci. Bull. **62**, 190–195 (2007).
17. P. A. Kryukov, *Solutions in Rocks, Soils, and Clays* (Nauka, Novosibirsk, 1971) [in Russian].
18. N. G. Minashina, "Concentration and composition of salts in the solution of a gypsum-containing soil as dependent on the soil water content," Eurasian Soil Sci. **38**, 718–726 (2005).
19. S. V. Nerpin and A. F. Chudnovskii, *Soil Physics* (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
20. A. I. Pozdnyakov, *Field Electrophysics of Soils* (Nauka, Moscow, 2001) [in Russian].
21. A. A. Ponizovskii, D. L. Pinskii, and L. A. Vorob'eva, *Chemical Processes and Equilibria in Soils* (Moscow State Univ., Moscow, 1986) [in Russian].
22. O. G. Rastvorova, *Physics of Soils: Practical Manual* (Leningrad State Univ., Leningrad, 1983) [in Russian].
23. A. A. Rode, *Soil Moisture* (Academy of Sciences of USSR, Moscow, 1952) [in Russian].
24. *Bound Water in Disperse Systems* (Moscow State Univ., Moscow, 1977) [in Russian].
25. A. V. Smagin, "Theory and methods of evaluating the physical status of soils," Eurasian Soil Sci. **36**, 301–312 (2003).
26. A. V. Smagin, "Soil-hydrological constants: physical meaning and quantification based on equilibrium cen-

trifugation," Dokl. Ekol. Pochvoved. **1** (1), 31–56 (2006).

27. A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, M. V. Glagolev, and A. V. Kirichenko, "New instrumental methods and portable electronic devices for the ecological monitoring of soils and adjacent media," Ekol. Vestn. Sev. Kavk. **2** (1), 5–17 (2006).
28. A. V. Smagin and N. B. Sadovnikova, "Physical mechanisms of water retention and dispersion dynamics in soils, rocks, and colloid-dispersed materials," Ekol. Vestn. Sev. Kavk. **13** (4), 4–20 (2017).
29. T. A. Sokolova, "Clay soil material as a block of "memory" about soil cover formation," Pochvovedenie, No. 5, 582–590 (1995).
30. T. A. Sokolova and S. Ya. Trofimov, *Sorption Properties of Soils. Adsorption. Cation Exchange* (Universitetskaya Kniga, Moscow, 2009) [in Russian].
31. I. I. Sudnitsyn, *Movement of Soil Moisture and Water Consumption by the Plants* (Moscow State Univ., Moscow, 1979) [in Russian].
32. I. I. Sudnitsyn, A. P. Shvarov, and E. A. Koreneva, "Integral energy of soil hydration," Estestv. Tekh. Nauki, No. 10, 85–87 (2011).
33. I. I. Sudnitsyn, A. V. Smagin, and A. P. Shvarov, "The theory of Maxwell–Boltzmann–Helmholtz–Gouy about the double electric layer in disperse systems and its application to soil science (on the 100th anniversary of the paper published by Gouy)," Eurasian Soil Sci. **45**, 452–457 (2012).
34. *Theories and Methods of Soil Physics* (Grif i K, Moscow, 2007) [in Russian].
35. V. V. Terleev, W. Mirschel, V. L. Badenko, I. Yu. Guseva, and P. D. Gurin, "Physical-statistical interpretation of the parameters of the soil water retention function," Agrofizika, No. 4, 1–8 (2012).
36. E. I. Shilova and K. G. Kreier, "Carbon dioxide of soil solution and its role in pedogenesis," Pochvovedenie, No. 7, 65–72 (1957).
37. T. E. Shitikova, "Composition of lysimetric waters of soddy-podzolic soils, Pochvovedenie, No. 4, 27–38 (1986).
38. V. V. Shcherbakov and Yu. M. Artemkina, "Electromagnetic properties of solutions," in *Proceedings of the All-Russia Forum of Young Scientists "A Step to the Future"* (APFN Scientific Technical Association, Moscow, 2012), pp. 20–28.
39. E. C. Brevik, Th. E. Fenton, and A. Lazari, "Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping," Precis. Agric. **7** (6), 393–404 (2006). doi 10.1007/s11119-006-9021-x
40. G. S. Campbell, *Soil Physics with BASIC* (Elsevier, Amsterdam, 1985).
41. R. Giesler, U. S. Lundstrom, and H. Grip, "Comparison of soil chemistry assessment using zero-tension lysimeters or centrifugation," Eur. J. Soil Sci. **47** (3), 395–405 (1996).
42. M. E. Essington, *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach* (CRC Press, Boca Raton, 2004).
43. B. R. Hanson and K. Kaita, "Response of electromagnetic conductivity meter to soil salinity and soil-water content," J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng. **123**, 141–143 (1997).
44. K. Kosugi, "Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties," Water Resour. Res. **32**, 2697–2703 (1996).
45. A. V. Smagin, "Column-centrifugation method for determining water retention curves of soils and disperse sediments," Eurasian Soil Sci. **45**, 416–422 (2012). doi 10.1134/S1064229312040126
46. A. V. Smagin, "Thermodynamic evaluation of the impact of strongly swelling polymer hydrogels with ionic silver on the water retention capacity of sandy substrate," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **52** (012087), 1–7 (2017). doi 10.1088/1755-1315/52/1/012087
47. V. V. Snakin, E. Kovasc-Lang, and T. L. Bystritskaya, "Methodological aspects of in situ ionometry in grassland ecosystems," Abstr. Bot. **10**, 87–95 (1986).
48. V. Terleev, R. Ginvesky, V. Lazarev, A. Nikonorov, I. Togo, A. Topaj, K. Moiseev, E. Abakumov, A. Melnichuk, and I. Dunaeva, "Predicting the scanning branches of hysteretic soil-water retention capacity with use the method of mathematical modeling," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **90** (012105), (2017). doi 10.1088/1755-1315/90/1/012105
49. D. Zabowski and F. C. Ugolini, "Lysimeter and centrifuge soil solutions: seasonal differences between methods," Soil Sci. Soc. Am. J. **54**, 1130–1135 (1990).

Translated by O. Eremina

SCIENTIFIC REPORTS
nature research

OPEN

Synthetic gel structures in soils for sustainable potato farming

Andrey Smagin[1,2], Nadezhda Sadovnikova[1,2] & Marina Smagina[2*]

Anti-pathogenic protection of potatoes remains one of the most pressing problems of sustainable agronomy and plant protection. For this purpose, we propose to use a new type of synthetic hydrogels filled with amphiphilic recipients (dispersed peat, humates) and modern plant protection products. We assumed that the introduction of swollen gel structures into the rhizosphere of potatoes will allow us: to optimize the water supply and productivity of potatoes; to protect the fertile layer and potato tubers from the main pathogens; to fix modern plant protection products in the rhizosphere, keeping them from leaching and entering the environment. Preliminary laboratory experiments tested the anti-microbial activity of gel structures, as well as their water retention, dispersity and hydraulic conductivity with subsequent computer modeling of the water exchange and root uptake in the system of "soil-gel-potato". Field trials were carried out in humid (European Russia) and arid (Uzbekistan) conditions under the atmospheric precipitation and irrigation on different soils and potato varieties with instrumental monitoring of environment, potato growth and quality. All experimental results confirmed the high efficiency of water-accumulative and plant protective synthetic gel structures. Their usage sufficiently (up to 6–15 t/hct) increases the potato yield with 1.3–2 times water saving, complete retention of agrochemicals in the rizosphere, and its actually total protection against major potato pathogens, including late blight (Phytophthora infestans).

Modern sustainable and environmentally friendly agriculture is looking for new technologies that allow us to obtain high yields of quality food products with minimal risk of environmental pollution, along with effective use and preservation of natural resources. One of the promising trends here is the development of agrochemical delivery systems to reduce pollution and health hazards[1–3]. In such a system, a pesticide, fertilizer or other bioactive agent is incorporated into a carrier, generally a polymeric material or a solid-phase adsorbent. It minimizes the impact of these harmful chemicals to the environment by reducing losses due to leaching, volatilization and biodegradation, and thereby, can potentially maintain biological efficacy of an active ingredient for a given time at a fixed point in space[2,3].

In the framework of this direction, our research presents the results of an innovative development using the synthetic gel structures (SGS) to aid soil in supplying plants with water, dissolved substances and simultaneously protecting the rhizosphere from pathogens. For the first time, as the controlled-release formulations, we offer combined polymer-adsorbent SGS based on acrylic hydrogels filled with amphiphilic solid-phase components, trace elements and modern plant protection products (PPP) in the form of silver ions, nanoparticles, and synthetic azoxystrobin fungicide. Unlike the widely used natural hydrophilic polysaccharides (cellulose, starch, alginate, dextran, pectin, chitosan) as controlled-release formulations of agrochemicals[2,3], the SGS based on acrylic polymers filled with the amphiphilic nature components are more resistant to soil biodegradation (a half-life ($T_{0.5}$) by 3–5 years or more[4], potentially minimizing the risk of leaching mineral fertilizers and pesticides from SGS. Most systemic pesticides have a half-life of less than 1 year; usually $30 < T_{0.5} < 90$ days for pesticides used to protect plants within a single cropping season[5]. Therefore, they must be guaranteed to disappear before the gel carriers are decomposed by soil microorganisms. Similarly, water-soluble fertilizers and trace elements will be absorbed by the roots of plants before the biodegradation of gel structures allows them to leach from the rhizosphere.

Our study, preceded by the laboratory experiments and technological simulations in HYDRUS-1D software[6], for the first time tests the effectiveness of new SGS in practice, aiding in the development of more sustainable cultivation and protection of potatoes directly in the soil. Most known PPP are targeted at predominantly surface treatment (spraying) and pest control of vegetative and generative plant's organs located above the soil. In this case, the underground phytomass remains practically unprotected. Therefore, it is often affected by pathogens

[1]Lomonosov Moscow State University, Leninsrye gory 1-12, 119991, Moscow, Russia. [2]Institute of Forest Science of RAS, Sovetskaya 21, 143030, Moscow region, Uspenskoe, Russia. *email: smagin@list.ru

that inhabit the rhizosphere, resulting in great yield damage, especially on farms and seed nurseries where row crops in the form of tubers and root vegetables are cultivated year after year without rotation[7]. Under such conditions, the soil may be subject to constant infection by pathogenic microflora (fungal and bacterial rot, oomycetes) that negatively affects seed material, and later the crop itself. In the Russian Federation, annual potato crop losses are about 20–30% depending on the cultivar, and in some years exceed 50% caused by similar pathogenic agents[8]. Worldwide average losses are estimated to be 8–10% - a several billion dollar loss[9]. Taking into account the great economic significance of the problem of anti-pathogenic soil protection for potato farming and the possibility of solving it on the basis of agrochemical delivery systems, in 2016 we started a project "Protective gel compositions for combating negative biological and edaphic factors of potato growing", supported by the Russian Scientific Foundation. This publication summarizes the main results of a 3-year long project developing and experimentally testing a new controlled-release system with synthetic gel carriers to protect and improve potato rhizospheres in humid (European territory of Russia) and arid (Uzbekistan) conditions under atmospheric precipitation, drip and furrow irrigation.

Materials and Methods

Synthetic polymer hydrogels. The new materials were produced at the Ural Chemical Factory (Russian Federation, Perm) under the trademark "Aquapastus" according to our patented technology of synthesis of filled acrylic hydrogels (Patent RU № 2639789 https://www1.fips.ru/publication-web). These products included various compositions of acrylic copolymers based on acrylamide and acrylic acid salts, filled by wastes of biocatalytic production of acrylamide, salts of humic acids in an aqueous paste as well as dispersed peat with additives of ionic silver. Methylene-bis-acrylamide was used as a crosslinking agent. The water absorption of new products by swelling in distilled water varies from 340 to 500 kg/kg for granules with in sizes near 1 mm sizes. The "Aquapastus"-11 (A11) hydrogel is the base co-polymer of acrylamide and ammonium acrylate filled (28%) by solid wastes of a biocatalytic production of acrylamide as a mixture of microbial cells, cell agglomerates and filtroperlit. The formulation "Aquapastus"-11H (A11H) includes, in addition to biocatalytic wastes (12%), humates of potassium and sodium amounting to 8% of dry matter. Its modification A11HMZ hydrogel is similar to the previous one, but with the addition of magnesium and zinc (the trace elements of mineral nutrition), 0.4% in terms of metals. The last two compositions A22 and A22Ag, along with the co-polymer of acrylamide and sodium acrylate, contain a finely dispersed peat as a filler (23.5%) and 0.1–1% additives of ionic silver. In laboratory experiments, the new products, described above, were compared with the well-known "Aquasorb" brend, manufactured by SNF-group (https://www.snf-group.com). It is a superabsorbing anionic polymer in the form of crosslinked copolymers of acrylamide and potassium acrylate, characterized by a maximum degree of swelling of at least 500 kg H_2O/kg for a granule size of 0.2–0.8 mm (Aquasorb 3005KM).

Water-accumulative and controlled-release protective gel's compositions. The gel structures were obtained by free 24-hour swelling of the hydrogels in pure water or in the solutions containing water soluble or suspended PPP, with a "dry gel: liquid phase" ratio equal to 1:100. As the PPP, we used a chemically pure $AgNO_3$, colloidal silver, and "Quadris" sythetic fungicide with azoxystrobin produced by Syngenta (Switzerland, Basel; https://www.syngenta.com). This fungicide is one of the few pesticides for intra-soil application that are allowed in the Russian Federation. The colloidal silver is an experimental product "Zeroxxe " of AgroChimProm GC (http://tdahp.ru/en/) that contains silver nanoparticles with a size of 10–70 nm superficially modified with environmentally safe biodegradable amphiphilic surfactant (tallow amphopolycarboxyglycinate-stabilizer)[10].

A laboratory assessment of the protective properties of the gel compositions was performed on a potato-dextrose agar medium with addition of the PPP in a wide range of concentrations from 10 to 1000 ppm (per water mass). For the field experiments, the controlled-release SGS were prepared in 50-liter plastic containers by a similar way with free swelling in aqueous solutions containing various PPP in a range of the concentrations from 20 to 500 ppm. A laboratory study of water-retention capacity, dispersity and hydraulic conductivity was carried out on pure gels and mineral-gel compositions of 0.05 to 0.3% dry hydrogels by weight of the mineral substrates, represented by a medium-grained and fine-grained quartz sands.

Laboratory experiments. *Laboratory analysis of SGS protective antimicrobial properties.* Protective fungicidal and antibacterial properties of the hydrogel compositions were tested using isolates of late blight (Oomycete *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) and black leg of potatoes (*Pectobacterium atrosepticum* (van Hall 1902)) obtained from the State collection of phytopathogenic microorganisms in All-Russian Research Institute of Phytopathology (http://vniif.ru/vniif/structure/collection). We used collection strains isolated in 2003–2007 from the Red Scarlett and the Sante potato varieties in the Moscow and Krasnodar regions of the Russian Federation. To identify the strains, a set of differentiator varieties including 22 genotypes from R1 (CIP N800986) to R11 (CIP N800996) obtained from the International Potato Center (CIP, Peru, https://cipotato.org) was used before the isolate was placed in the collection. A preliminary test of the pathogens at the Institute of Phytopathology confirmed their virulence in relation to susceptible potato varieties. The main experiment was carried out at the optimum temperature (25 °C) using potato-dextrose agar medium (PDA) for the growth of pathogenic microorganisms (grated potato 200 g; dextrose 20 g; agar 20 g; tap water 1000 ml, pH 6.5–7.0). In the SGS trials, the hydrogels and agar were mixed in a 1:1 ratio with a dose of 10 g of each substance per 1 l of medium. The inoculation was carried out in the center of a 100 mm diameter Petri dish, in the form of mycelium excision 5 × 5 mm (*Phytophthora*), or in similar sized inoculation area created by a microbiological loop (*Pectobacterium*). During incubation, the dishes were periodically photographed to fix the area of the growing colonies of pathogens with its futher digitization using graphic analysis in the computer program Adobe Photoshop CS2. An estimation of the area (*S*) was carried out in three replications for the control (PDA) and each experimental variant with different concentrations of PPP in all types of the hydrogels. A comparative measurement of the area *S* was performed when the

colonie's sizes in PDA reached the area of the Petri dish (S_c). The dimensionless $X = (S - S_0)/(S_c - S_0)$ indicator adjusted for the inoculation area (S_0) was used to calculate the median or half-maximal (50%) effective concentration (EC_{50}) of the PPP, when X is equal to 0.5, as well as the effective concentration (EC_{95}) of the complete (95%) growth inhibition, when $X = 0.05$, on the basis of the exponential model obtained in[8]:

$$C = A \cdot \exp(-kX), \tag{1}$$

where C is the concentration of the PPP, [ppm]; A, [ppm], k [dimensionless] are the empirical parameters of the model. The corresponding formulas for the calculation look like:

$$EC_{50} = A \cdot \exp(-0.5k); \tag{2}$$

$$EC_{95} = A \cdot \exp(-0.05k). \tag{3}$$

Water-retention, dispersity and hydraulic conductivity analysis, and technological modeling. A modified thermodynamic analysis of water-retention characteristics (WRC) and dispersity of the gel's compositions was carried out by combination of equilibrium centrifugation[11] with a new method of the soil water thermodesorption[12]. We used a high-speed laboratory centrifuge Hettich Universal 320 (Germany) and its Russian analogue CLN-16 with a water-retention energy range (absolute values of the soil water potential (Ψ) or the equivalent soil water pressure from 0 to 3030 J/kg (kPa) as a function of soil water content per dry weight (W). After the last stage of centrifugation (12000 rpm), the samples were placed for differentiated drying at temperature of 30, 40, 50, 60, 70, 80, 105 °C into a KD 200 drying oven (China) with forced air circulation and ventilation. This simple procedure estimates WRC in the range of absolute values of the thermodynamic potential of soil water from 3020 to 1000000 J/kg, as well as a specific surface area according to our methodical developments[12]. A specific surface area (S) of the gel compositions was evaluated in two independent ways – according to the theory of Brunauer-Emmett-Teller (S_{BET}) following the transformation of WRC to desorption isotherms[12], and directly by the slope of WRC in semi-logarithmic coordinates (S_{WRC}) using the fundamental ion-electrostatic model of disjoining pressure, as proposed by[13]. This model, as a rule, adequately describes the sorption section of WRC at absolute values of the water potential of more than 1000 J/kg.

Approximation of WRC experimental data in the range of dominance of capillary forces has been performed by the van-Genuchten model[14]. The model parameters were also used to convert WRC to the structural curves pore volume distribution by the size of their radii ($V(r)$) according to the formula[15]:

$$V(r) = (n - 1)(W_s - W_r)\rho_b(1 + (\alpha P)^n)^{-m-1}(\alpha P)^n, \tag{4}$$

where P is an absolute value of the soil water pressure (potential); W_r is the residual water content corresponding to tightly bound water; W_s is the water content in a state of saturation of the soil (full water capacity); α, n, $m = 1 - 1/n$ are the van-Genuchten empirical constants; ρ_b is the soil bulk density.

Evaluation of the values of field water capacity (FWC), wilting point (WP) and the available soil water range ($AWR = FWC - WM$) from WRC data was implemented by the Voronin[16] method using our computer algorithm[15]. Saturated hydraulic conductivity (K) was determined at the laboratory permeameter in cylindrical columns 10 cm long with water supply to the surface of the sample by a Mariott device with an automatic mode of non-pressure flow.

Experimental data of water retention parameters W_s, W_r, α, n in the standard van Genuchten function as well as a saturated hydraulic conductivity K were used in HYDRUS-1D computer software for the technological modeling of water exchange and root consumption in a soil-gel-plant system, according to[6]. For this purpose, we used multivariate computer simulations in the HYDRUS-1D software for a potato culture with potential water consumption of 3–5 mm/day (the upper boundary condition) and with localization of the hydrogel and roots within a 20 cm soil layer in a 2 m soil profile initially saturated with water under free outflow from the lower boundary (the seepage face lower boundary condition).

Laboratory pathogen's diagnosis and chemical analysis. The potential infection of tubers by pathogenic microflora was determined in the Department of Potato and Vegetable Diseases at the All-Russian Research Institute of Phytopathology (http://vniif.ru). The accepted methods was used which implies an initial 4-week incubation of pre-moistened tubers in hermetically sealed plastic bags to create optimal conditions for the development of putrefactive microflora. Species composition of the putrefied microflora pathogens were then determined. Also, for the anti-pathogenic effectiveness of the SGS in the analysis of tubers, we applied a new development in matrix PCR diagnostics of the main potato pathogens. This express analysis was performed by GenBit LLC (http://genbitgroup.com) and the All-Russian Research Institute of Phytopathology (http://vniif.ru) using the AriaDNA microarray amplifier ("Lumex" LLC, Russia) and Potato DNA Pathogens microarrays for the presence of the following bacterial and oomycetic pathogens: *Phytophthora infestans, Pectobacterium atroseptumptum, subsp. carotovorum, Dickeya dianthicola, Dickeya solani, Clavibacter michiganensis subsp. sepedonicus, Ralstonia solanacearum*. Total DNA from the potato samples (100 mg of stolon and pulp tissue from each tuber) was isolated by the method of affinity sorption using the "RIBO-sorb" isolation kit (http://InterLabService.ru). After isolation, a DNA-containing buffer solution (1.2 µl) was placed in the microarray reaction zone under a layer of mineral oil (620 µl), using a similar RNA-buffer solution without DNA as an untreated control. The filled microarrays were placed in the fuser of the AriaDNA microarray amplifier. The analysis was carried out automatically using the Ariadna software with real-time recording of the amplification results. A change in the fluorescence level corresponding to the presence of DNA of the diagnosed pathogens was displayed on the amplification graphs. The

result of the analysis for the presence of the target pathogen was considered positive if the threshold cycle (C_t) values for the corresponding pathogen do not exceed 35 units. The calculation of threshold cycles is performed by the software of the amplifier in automatic mode.

The silver content in the SGS, phytomass, soil, and drainage water solutions was evaluated by potentiometry using the Ecotest 2000 ionomer with ion-selective electrode XC-Ag-001 (Russia, http://econix.com), and by XRF-technology using the Olympus Vanta Pro analyzer (https://olympusxrf.com).

All laboratory experiments were carried out with 3–4 replicates and subsequent statistical and mathematical analysis of data using standard functions of MS Excel 2007 and the nonlinear Regression Wizard of S-Plot 2001 software.

Field experiments. *Potato growing experiments.* The field experiments testing a new system of protection and optimization of potato rhizospheres were carried out at 3 localities in humid and arid climatic conditions, natural rainfall, and irrigation. At all sites the complete randomized block design included several different treatments and an untreated control, each in triplicate. The experimental unit with individual treatment consisted of a 2–5m-wide by 10–20m-long plot separated from adjacent plots with a 0.5–1m-wide buffer strip. The basic test site was placed in the Serebryanoborsky experimental station of the Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences (N55.77090274, E37.39450062) in Moscow on medium-cultivated sod-podzolic loamy sandy soils underlain by sandy alluvium. The first experiment was conducted here in the summer of 2017 under natural rainfall. The Red Scarlett potato cultivar susceptible to late blight was tested in two seed options: one was normatively free from pathogens super elite tubers, the other was highly (40–50%) infected tubers with a complex of pathogens (ordinary scab – *Streptomyces scabies*, anthracnose – *Colletotrichum coccoides*, fusariose – *Fusarium sp*., rubber rot – *Geototrichum candidum*, bacterial rot – *Pectobacterium sp*.). As controlled-release carriers, two types of SGSs (A11 and A22) were tested in randomized 50 m^2 plots with doses of 0.5 l and 1.0 l per potato bush without mixing with the soil and with the next PPP concentrations: fungicide "Quadris" – 20, 100, 500 ppm; ionic silver – 20, 100, 500 ppm; silver nanoparticles – 20, 50, 200 ppm. The next experiment at the same locality and with the same potato variety was carried out during the growing season of 2018 in a closed polycarbonate greenhouse with automatic ventilation and 8 automated drip irrigation lines controlled by GA-319N electronic timers (China) for starting and stopping water supply and Equatel-SVK-15G flowmeters (Russia). The experiment included the following treatments: untreated control (without SGS, watering due to moisture deficit, or 100% watering time), A22 hydrogel composition with fungicide "Quadris" (50 ppm), A22 hydrogel composition with silver ions (100 ppm), and A11 hydrogel composition with silver nanoparticles (100 ppm), in doses of 0.5 and 1.0 l hydrogels per potato bush, and an SGS arrangement as a continuous layer without mixing and with uniform mixing of the hydrogel and the soil in equal volumes. The experimental plots had two drip irrigation treatments: normal (100% watering time) and economical (50% watering time relative to untreated control). A similar experiment in a closed greenhouse with manual sprinkling irrigation was carried out in 2018 farther south in semi-arid conditions at the experimental station of the Kuban State Agrarian University in Krasnodar (N45.05099734, E38.92116193). The treatment and tested compositions with PPP were the same as in the previous experiment, excluding synthetic fungicide. The Lady Claire potato variety was grown on light loamy ordinary chernozem and its compositions with SGS. The final experiment in 2018 was carried out on the Gala potato variety in arid conditions of Uzbekistan (Tashkent region, Qumaryk farm (N 41.06613390, E 69.33949355)). The experiment was conducted on typical medium loamy grey soil (serozem) under furrow irrigation. Here we tested gel compositions A11 and A22Ag, which contained 25–50 ppm silver ions per mass of 1:100 swollen SGS in two doses of 0.5 and 1.0 l for every 0.5 linear meters of the furrow, under furrow irrigation of 50 and 100% of the applicable irrigation rate.

The field work included mechanical treatment of the site (plowing, harrowing, cutting furrows), SGS embedding and planting potatoes, periodic weeding and loosening (4–8 times per season), hilling, irrigation (for irrigation treatments), pre-harvest cutting of potato tops, harvesting with a differentiated assessment of the quantity, weight, and linear dimensions (length, width) of the potato tubers. During the growing of potatoes, we carried out a morphometric manual control of the height (H) of the bushes and the diameter (D) of their projected cover. Additionally, we carried out an automated control of atmospheric and soil hydrothermal parameters (temperature, relative humidity, precipitation) and soil moisture (water-air index) in the surface (0–5 cm) layer and in the rhizosphere (10–20 cm) in accordance with previously developed methods, criteria and standards[17]. The kinetics data of potato plant growth were fitted by the Verhulst-Pearl logistic model:

$$H/H_{max} \text{ or } D/D_{max} = \{1 + a \cdot \exp(-bt)\}^{-1}, \quad (5)$$

where t is time, H_{max} and D_{max} are limit (maximum) values of the height and diameter of the potato plants during their growth period; a, b are the empirical constants of the model, and b is the so called Malthusian growth parameter. The model (5) allows us to estimate half-life characteristics ($T_{0.5}$) of different treatments, according to the following simple formula:

$$T_{0.5} = \ln(a)/b; \quad (6)$$

Hydrothermal parameters and soil moisture were estimateded in an automatic mode by programmable sensors "Hygrochron" DS1923 (https://www.maximintegrated.com/) and loggers Decagon with sensors 5TE (https://decagon.com).

PPP leaching experiment. The environmental risk of PPP leaching from the soil treated by plant protective acrylic SGS was assessed at the first (base) test site with the most water-permeable sandy loam soil using the most mobile SGS component in a form of silver ions. We used both the indirect method, taking into account the balance of silver in the rhizosphere, and the direct assessment of the silver ions leaching by percolated water in

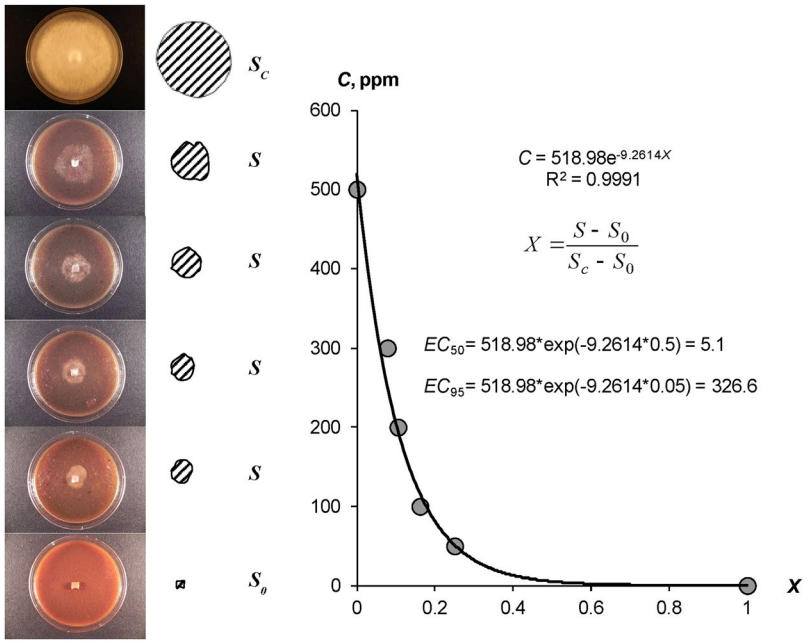


Figure 1. Quantitative approach to the EC_{50} and EC_{95} assesment: on the example of *Phytophthora infestans* growth in Petri dishes under the influence SGS A22 with silver nanoparticles (designations see in "Materials and methods", formulas 1–3).

lysimetric soil monoliths, according to[17]. A monolith of loamy sandy soil (untreated control) or its composition with the SGS containing the same amount (100 ppm) of silver ions was placed in 50-cm PVC tube, which has a removable container-lysimeter at the bottom for the accumulation of percolated water. A PVC tube was placed in a vertical soil well with a porous casing made of foamed polyethylene. Every ten days a water sample was removed from the container and then analyzed in the laboratory for silver ion content. Using an alternative indirect method, we investigated the change in silver reserve in a 20 cm soil layer with protective SGS over a 2-year period.

Results and Discussions

Laboratory analysis of SGS protective antimicrobial properties. Figure 1 illustrates the visual anti-fungal effect of the composition A22 with silver nanoparticles as well as our new method for EC_{50}, EC_{95} estimation using the exponential model[8]. The estimated EC_{50} and EC_{95} values for different SGS are shown in Table 1. The EC_{50} of the studied SGS varied within a range of 0.9 ± 0.1 to 63.0 ± 19.6 ppm. Similar results were obtained from the same laboratory microbiological method (silver ions or nanoparticles in the composition of dense, gel-like agar medium, or in the foams as saponins) in the following studies: EC_{50} from 30 to 50 ppm in[18]; diapason EC_{50}– EC_{99} from 10 up to 111 ppm in[19]; EC_{50}– EC_{99} from 50 to 100 ppm[20]; EC_{50} from 13 to 50 ppm[21]; EC_{50} from 10 to 15 ppm[22]. Gel compositions based on silver nanoparticles in the case of late blight had lower-range average values (1–17 ppm). Similar compositions with ionic silver and synthetic fungicide were characterized by higher EC_{50} values of 17–60 ppm relative to the late blight, i.e. lower fungicide effect. With respect to *Pectobacterium*, gel compositions based on ionic silver appeared to be generally more efficient than silver nanoparticles and synthetic fungicide. The EC_{50} concentrations for the hydrophilic "Aquasorb" and A11 gels varied from 1.1 ± 0.5 ppm to 5.1 ± 1.9 ppm, while the values for the compositions with nanoparticles and "Quadris" were higher, ranging from 2.4 ± 0.4 to 11.0 ± 3.5ppm. In contrast to the hydrophilic SGS, the bactericide effect of the composition with amphiphilic composition A22, silver nanoparticles and synthetic fungicide was 1.3–2 times higher than the ionic silver analogue. Therefore, the type of SGS (hydrophilic or amphiphilic) may affect the biocidal properties of SGS, which is confirmed by LSD method at $p = 0.05$ (*Phytophthora*) and $p = 0.01$ (*Pectobacterium*) significance levels. Complete inhibition of pathogenic agent activity EC_{95} ranged from 187 ± 13 to 448 ± 31 ppm in the case of late blight and from 76 ± 14 to 501 ± 61 ppm for potato black leg. These values exceeded the estimations of the PPP efficiency 10–50 times or more based on the EC_{50} alone. The obtained EC_{95} values were rather higher than doses of 75–100 ppm of aquatic solution or dispersion of silver with 99% suppressive effect[9,23]. This may be due to both, slightly different mobility of PPP in aqueous solutions and gels, and the specificity of the tested microflora in aquaculture.

The "Quadris" synthetic fungicide has a half-life of $3 \leq T_{0.5} \leq 39$ days (http://wineryclub.info/handbook/14-kvadris.html). This obviously guarantees its total biodegradation in our gel compositions with a half life of at least 3–5 years, according to[4]. In contrast to these biodegradable PPP, the silver-gel compositions require an assessment of maximum allowable concentrations. For aquatic plants and aquaculture, a two-fold decrease in growth occurs at 10–20 ppm (up to 150 ppm for green algae) of silver ions or nanoparticles[24,25]. In the soil, for which protective SGS are designed, the value EC_{50} for plants varies in the range of 50–1000 mg/kg of the solid phase[26]. In terms of the soil liquid phase, it gives the range from 250 to 5000 ppm at 20% water content. Shclich

SGS/*patogen*/treatment	EC_{50}	EC_{95}
1. *Phytophthora*		
Ionic silver		
"Aquasorb"	42. ± *4.4	448 ± 31
A11	63.0 ± 19.6	467 ± 29
A22	17.0 ± 5.4	406 ± 44
$LSD_{0.05}$*	**24.0**	**70.6**
$LSD_{0.01}$*	**36.4**	**106.9**
Silver nanoparticles		
"Aquasorb"	1.4 ± 0.2	264 ± 13
A11	0.9 ± 0.1	272 ± 80
A22	5.8 ± 2.4	241 ± 90
$LSD_{0.05}$	**2.8**	**139.9**
$LSD_{0.01}$	**4.2**	**211.8**
"Quadris" sythetic fungicide		
"Aquasorb"	14.1 ± 3.3	237 ± 18
A11	4.9 ± 3.1	222 ± 10
A22	17.3 ± 6.5	187 ± 13
$LSD_{0.05}$	**9.1**	**28.1**
$LSD_{0.01}$	**13.9**	**42.6**
2. *Pectobacterium*		
Ionic silver		
"Aquasorb"	1.1 ± 0.5	63 ± 15
A11	5.1 ± 1.9	76 ± 14
A22	40.3 ± 14.0	501 ± 61
$LSD_{0.05}$	**16.3**	**74.3**
$LSD_{0.01}$	**24.7**	**112.6**
Silver nanoparticles		
"Aquasorb"	2.7 ± 0.5	341 ± 48
A11	2.4 ± 0.4	335 ± 21
A22	21.0 ± 9.3	457 ± 64
$LSD_{0.05}$	**10.6**	**95.5**
$LSD_{0.01}$	**16.3**	**144.7**
"Quadris" sythetic fungicide		
"Aquasorb"	6.0 ± 2.3	69 ± 26
A11	11.0 ± 3.5	78 ± 28
A22	28.2 ± 10.3	382 ± 59
$LSD_{0.05}$	**12.8**	**81.2**
$LSD_{0.01}$	**19.4**	**122.9**

Table 1. The effective concentration for two-fold and total suppression of pathogenic microflora growth. *Hereinafter, ± means the boundaries of the confidence interval at $p < 0.05$ significance level, **$LSD_{0.05}$** and **$LSD_{0.01}$** are the Least Significant Differences at $p = 0.05$ and $p = 0.01$ significance levels, respectively.

et al.[27] reported a slightly smaller EC_{50} for ionic and colloidal silver ranging from 200 to 400 ppm for soil earthworms after experiments with silver doses of 15 to 1000 mg/kg or from 75 to 5000 ppm at 20% soil moisture, respectively. Taking into account the obtained results, we have chosen to test a PPP range of 20 to 500 ppm in the field.

Thermodynamic laboratory analysis of WRC, dispersity, and saturated hydraulic conductivity of SGS. The water-retention characteristics of several SGS and the structural curves of pore size distribution calculated by WRC are shown in Fig. 2 for A11, A11H (*a*), and A22 (*b*). The solid lines in the main figures of the WRC represent the fundamental ion-electrostatic model of disjoining pressure[13] and the standard van-Genuchten model[14]; the dotted line shows the secant for determining the field water capacity by the Voronin[16] method. All tested compositions were characterized by a stable increase in water-retention proportional to a dose of the hydrogels over a wide 0–1000 kJ/kg range of the absolute soil water potential values. The WRC of the tested SGS have been regularly shifted right with respect to the control position (mineral substrates), which indicates an increase in energy of water-retention and moisture capacity of the samples. Alternatively, pore size spectra had a tendency of moving left towards smaller sizes. Such tendency, we believe, reflects an effect of aggregation of the mineral mass by SGS. Table 2 contains traditional agrophysical parameters of field water capacity, the available soil water range and the indicators of a specific surface area estimated by the BET method and by the

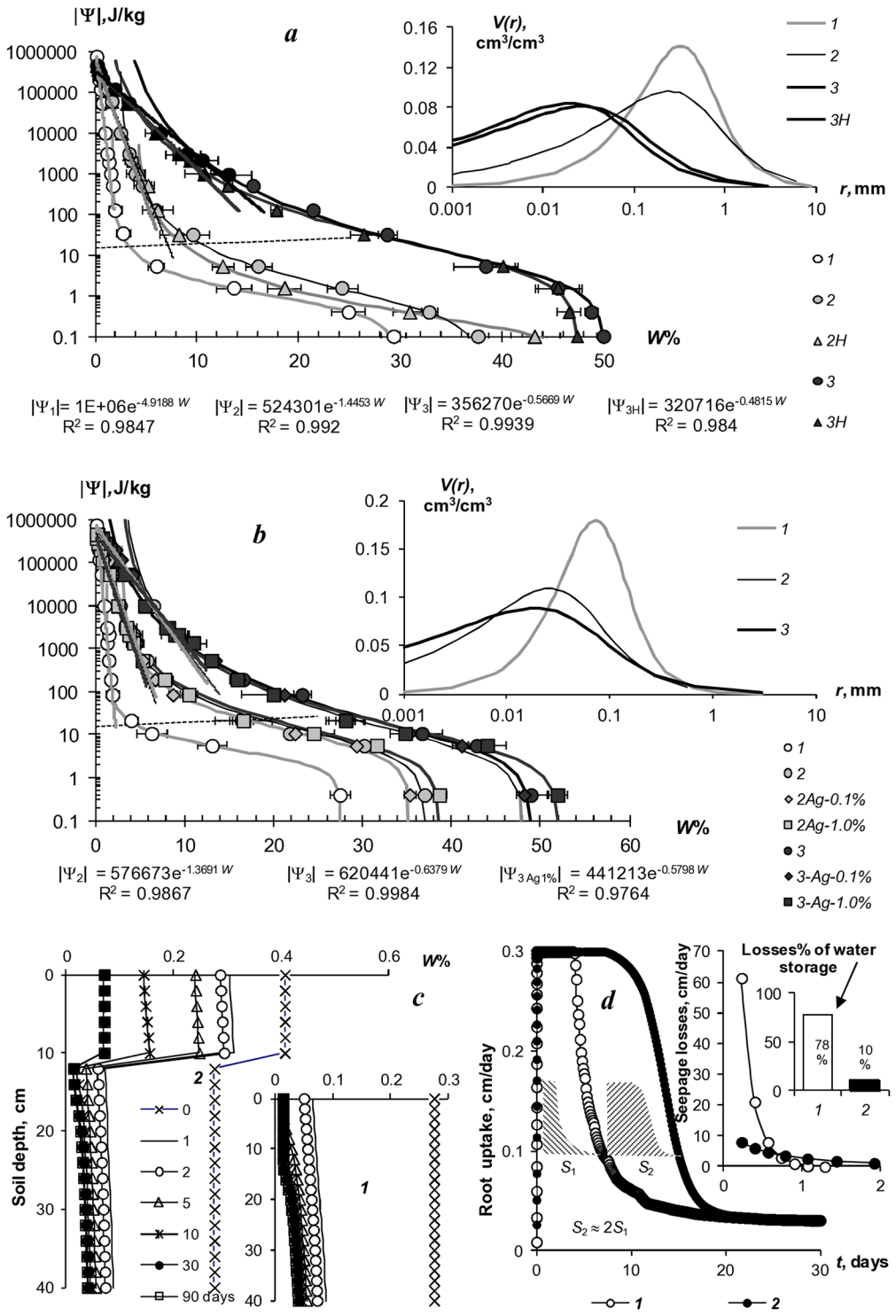


Figure 2. WRC of synthetic gel structures and technological modeling of their application in the soil: (**a**,**b**) WRC (main figure), pore distribution (inset); *1* – control, *2* – 0.1%, *3* – 0.3%SGS, *H* – humates; (**c**) water regime modeling, (**d**) root water uptake and down flow losses modeling: *1* – sandy soil, *2* – 0.2%SGS.

slope of WRC. Field water capacity at hydrogel doses of 0.2–0.3% from the soil dry mass constitutes a 15–25% compared to a 3.3–4.6% in sandy substrates, which means that water retention in such doses increases 5–8 times corresponding to translation of the original sandy substrates in the loamy soil by this indicator. Along with that, the increase in the wilting point rarely exceeded 2–5 times. As a result, the *AWR* was expanding 4–8 (up 10–13) times as compared to the original mineral substrates (Table 2). A specific surface area of the studied SGS increases 3–3.8 times at hydrogels concentrations of 0.1% and up to 6.0–10.2 times at higher doses of 0.2–0.3%, reaching the values of 40–60 m^2/g (up to 75 m^2/g), typical for light and medium loams. From a methodological point of

SGS doses %	FWC%	WP %	AWR%	Ws m^3/m^3	Wr m^3/m^3	α kPa^{-1}	n	K cm/day	S_{WRC} m^2/g	S_{BET} m^2/g
Monomineral quartz sand (control-1):										
0%	4.6	1.3	3.3	0.27	0.01	0.31	2.26	520	7.4	8.0
"Aquasorb" SGS										
0.1%	19.2	4.2	15.0	0.39	0.03	0.146	1.61	29	27.4	31.0
0.2%	26.0	8.3	17.6	0.49	0.04	0.209	1.40	17	47.8	51.1
0.3%	28.5	9.8	18.7	0.49	0.01	0.185	1.30	9	64.0	63.6
$LSD_{0.05}$	**2.6**	**0.8**	**1.8**	—	—	—	—	**31.3**	**5.1**	**5.3**
$LSD_{0.01}$	**3.9**	**1.2**	**2.7**	—	—	—	—	**47.4**	**7.7**	**8.0**
A22 SGS										
0.1% PM	18.6	4.0	14.5	0.37	0.01	0.183	1.50	37	26.5	26.9
0.1% + Ag 0.1%	17.0	4.1	12.9	0.35	0.03	0.169	1.61	—	28.2	30.0
0.1% + Ag 1%	19.5	4.1	15.3	0.39	0.01	0.199	1.45	29	26.0	23.3
0.2%	23.7	5.8	17.9	0.41	0.02	0.13	1.44	19	36.1	35.0
0.2% + Ag 0.1%	22.7	6.6	16.1	0.40	0.02	0.188	1.36	—	42.5	45.1
0.2% + Ag 1%	21.6	6.9	14.6	0.39	0.06	0.118	1.63	17	44.4	42.3
0.3%	28.6	9.5	19.1	0.49	0	0.203	1.29	6	56.8	55.0
0.3% + Ag 0.1%	27.4	9.9	17.5	0.48	0.03	0.232	1.32	—	53.5	55.2
0.3% + Ag 1%	29.0	9.6	19.4	0.52	0.03	0.213	1.34	10	62.5	61.9
$LSD_{0.05}$	**2.7**	**0.8**	**1.9**	—	—	—	—	**23.7**	**5.0**	**5.0**
$LSD_{0.01}$	**4.1**	**1.2**	**2.9**	—	—	—	—	**35.9**	**7.6**	**7.5**
Monomineral quartz sand (control-2):										
0%	3.3	1.7	1.6	0.29	0.02	1.655	1.87	460	7.1	8.0
A11 SGS:										
0.1%	10.2	3.6	6.6	0.38	0.02	1.913	1.42	31	22.6	24.5
0.2%	20.7	9.6	11.1	0.53	0	6.459	1.19	15	62.7	62.9
0.3%	28.4	11.4	17.0	0.50	0.02	0.323	1.26	9	75.2	73.3
$LSD_{0.05}$	**2.2**	**0.9**	**1.3**	—	—	—	—	**27.7**	**6.0**	**6.0**
$LSD_{0.01}$	**3.3**	**1.4**	**1.9**	—	—	—	—	**41.9**	**9.2**	**9.1**
A11H SGS:										
0.1%	8.6	4.5	4.1	0.50	0.04	7.257	1.47	26	23.8	23.7
0.2%	16.7	7.2	9.5	0.49	0	9.817	1.20	17	45.7	47.0
0.3%	28.1	9.7	18.3	0.48	0	0.230	1.27	8	75.2	75.0
$LSD_{0.05}$	**2.0**	**0.8**	**1.3**	—	—	—	—	**27.7**	**5.5**	**5.5**
$LSD_{0.01}$	**3.1**	**1.2**	**1.9**	—	—	—	—	**41.9**	**8.3**	**8.4**
A11HMZ SGS:										
0.1%	9.4	4.6	4.8	0.57	0.04	7.337	1.46	31	25.6	28.2
0.2%	15.2	6.2	9.0	0.53	0.02	7.389	1.27	16	39.1	37.5
0.3%	29.7	9.5	20.2	0.53	0.02	0.231	1.29	10	56.6	59.6
$LSD_{0.05}$	**2.1**	**0.7**	**1.4**	—	—	—	—	**27.7**	**4.4**	**4.6**
$LSD_{0.01}$	**3.2**	**1.1**	**2.1**	—	—	—	—	**41.9**	**6.7**	**6.9**

Table 2. Estimated parameters of water retention, conductivity and dispersity in mineral-gel compositions. Note: ***FWC*** is field water capacity, ***WP*** is wilting point, ***AWR*** is available soil water range; ***Ws***, ***Wr*** α, ***n*** are the van-Genuchten model parameters (see formula 4); S_{WRC}, S_{BET} are specific surface area obtained by WRC and BET methods, respectively.

view it's important to note that the specific surface area estimated by the standard BET method actually coincided with one estimated by the slope of WRC proposed in[13] on the basis of the fundamental ion-electrostatic model of disjoining pressure. The usage of amphiphilic fillers (humates, peat) in the production of the Ural Chemical Factory did not significantly change water retention properties of the SGS compared to hydrophilic formulations of A11 and "Aquasorb". A similar result concerning insignificant (at $p = 0.01$ significance level according $LSD_{0.01}$ criterion) changes in water retention is obtained by comparing the amphiphilic options supplemented or not with electrolyte's admixtures (A11HMZ vs A 11H). Inclusion of ionic groups of electrolytes in the acrylates and humates form in the structure of a polymer matrix allows us to solve the problem of reducing the hydrogel's swelling as affected by the osmotic stress[28]. Moreover, embedded cations can react in ion exchange and serve as a source of elements of plant's mineral nutrition. As the experiment with the samples of A22 Ag amphiphilic gel at a dose of 0.1–1% silver shows, the compositions based on it did not significantly worsen water retention, dispersion and structural properties, which remained at the level of "Aquasorb" European brend in the same SGS concentrations of 0.1–0.3% (Fig. 2a,b; Table 2). All obtained data of the WRC have been fitted adequately (determination coefficient $R^2 = 0.98–0.999$, relative standard approximation error s = 2–7%) by the standard van Genuchten

model[14] in the capillary range ($|\psi| = 0$–1000 J/kg) and by the fundamental ion-electrostatic model[13] in the range of surface absorption mechanisms ($|\psi| > 1000$ J/kg), as the Fig. 2a,b shows. The parameters of the van Genuchten model along with the values of saturated hydraulic conductivity (K) are contained in Table 2. The use of the SGS greatly (up to 10–80 times) reduces water permeability of sandy soil substrates that, along with an increase in water retention, should minimize unproductive water losses from the rhizosphere. The next section confirms this assumption using a computer simulation of water exchange in a soil-gel-plant system.

HYDRUS-1D computer modeling of water exchange and root consumption in a soil-gel-plants system. The simulation results (Fig. 2c,d) revealed a regular increase in water supply of the rhizosphere and prolongation of active root water uptake in proportion to SGS doses. The minimum doses (0.1–0.2%) of SGS in a 10 cm layer is quite enough for a 1.5–2-fold increase in available water storage within the rhizosphere relative to the initial sandy substrate and prolongation of active (3–5 mm/day) potato root consumption from 5 to 10 days. This effect occurs due to the increased water retention of the gel compositions, as well as a strong decrease (up to 10 times) in unproductive seepage losses of water from the rhizosphere through the gravitational outflow (Fig. 2d inset). A layered method for the SGS placing was more effective in reducing capillary-gravitational outflow of water from the rhizosphere compared to a uniform gel's distribution. The total root consumption during the growing season (the area under the curves in main Fig. 2d) divided by the transpiration coefficient gave an estimate of the potential productivity of the potato when using SGS. For the tested Red Scarlett, Lady Claire and Gala potato varieties, these values were approximately 30, 40 and 60 t/hct.

Summarizing the preliminary laboratory study and the results of technological modeling, we selected for field experiments working doses of hydrogels in the range of 0.1–0.2% with PPP content from 20 to 200 (up to 500) ppm both in uniform SGS layout and in mixing with the soil. Presumably, they were supposed to ensure the planned potential productivity of the test potato varieties (30–60 t/hct) with 1.3–2 times water saving and effective crop protection from the main potato pathogens, including late blight. Subsequent field trials fully confirmed the possibility of obtaining such results in practice.

Potato growing field experiments with SGS under atmospheric precipitation (2017). The first field experiment was held in the European part of the Russian Federation in 2017 under difficult weather conditions with excessive precipitation and widespread development of late blight. An example of the results of monitoring hydrothermal indicators: temperature (T), relative humidity (RH%), as well as the index of the water-air regime of the soil (W/Ws, where W is the soil water content; Ws -water content in saturated state) is shown in Fig. 3. A ratio W/Ws close to 0 or 1 means the lack of water or air in the plant rhizosphere, respectively[17]. During the growing season, temperatures ranged from 2.6 to 35.1 °C with an average of $T = 17.0 \pm 6.0$ °C, for the entire period, and relative humidity from 19.4 to 100% with an average value of $RH\% = 78.8 \pm 20.5\%$. This indicates a high probability of developing a moisture-loving pathogenic microflora, including late blight. In the potato rhizosphere treated by the SGS, the $RH\%$ ranges from 85 to 100%, and the W/Ws ratio from 0.2 to 1 with the dominance of optimal values of $W/Ws = 0.6$–0.9. In the untreated control and in the upper soil layer over the hydrogel compositions, these indicators were significantly lower: $RH\% = 31$–100% and $W/Ws = 0.1$–0.6. The common trend of a 1.5-3-fold excess of the W/Ws index for the layer with hydrogel compositions compared to the untreated control indicated a similar increase in the amount of available water and, accordingly, potential potato productivity. In general, despite unforeseen extreme weather conditions and an increased infectious background, we managed to achieve a 1.3-2-fold increase in potato yield with 100% protection of tubers from a massive outbreak of late blight (Fig. 4). In the plots with the initially infected (40–50%) seeds, the excess of the crop was 100–200% relative to the untreated control (a reference yield of 17.1 ± 8.6 t/hct). The SGS teeated plots with initially healthy uninfected seeds had a 20–60% increase a reference yield of 39.2 ± 4.9 t/hct in the untreated control. An assessment of the potential pathogenic affection of potato tubers after their incubation in plastic bags gave no more than 4–5% damage by epiphytic microflora (ordinary scab) for the SGS protective treatment, whereas on the untreated control, pathogenic damage reached 80–100% with deep infection penetrating into tubers due to development of fungal and bacterial rots (*Phytophthora infestans*, *Colletotrichum coccoides*, *Fusarium sp*., *Streptomyces scabies, Geototrichum candidum*, *Pectobacterium sp*.). Alternative PCR diagnostics of freshly harvested tubers revealed the presence of pathogens: *Phytophthora infestans, Clavibacter michiganensis subsp. sepedonicus, Pectobacterium atrosepticum and Pectobacterium carotovorum subsp. carotorum* in the untreated control, however any target potato pathogens were not detected on the tubers from the SGS treated plots. A visual assessment of the SGS protective treatments did not exceed 1–2% of actual pathogenic damage of potato tubers of a new yield, while the overhead potato phytomass was strongly affected by late blight: 100% in the untreated control plots, 80–100% in the case of compositions with silver nanoparticles, 30–50% for the ionic silver and 10–30% for the "Quadris" fungicide compositions, which, in contrast to silver nanoparticles, demonstrated a translaminar effect able to protect the aerial parts of plants.

The morphometric measurements revealed a statistically significant increase (up to 1.5–2 times) of root length under the influence of the SGS, with the exception of the "Quadris" fungicide compositions, a close correlation between the height and the projected diameter of the potato bushes ($D = 0.913\,H$, $R^2 = 0.83$, for 943 plant's samples) and the full correspondence of the potato growth to the Verhulst-Pearl logistic model ($R^2 = 0.98$–0.99) with the Malthusian parameters $b = 0.11$–0.17 day^{-1}, half-life $T_{0.5} = 30$–39 days, $H_{max} = 22$–53 cm. The amphiphilic compositions A22 were found to be most effective in conditions of an abnormally wet year at medium silver-based PPP concentrations (100 ppm) and low SGS application doses of 0.5 l/bush. High (400–500 ppm) doses of silver in the protective SGS, and in the case of the "Quadris" fungicide, the relatively low concentrations (20–100 ppm) can inhibit the growth of the plants themselves and the yield of potato tubers. However, a clear advantage of the "Quadris" fungicide composition is a translaminar effect because of which only this treatment has been resisted complete destruction of the overhead potato phytomass by late blight in the second half of the

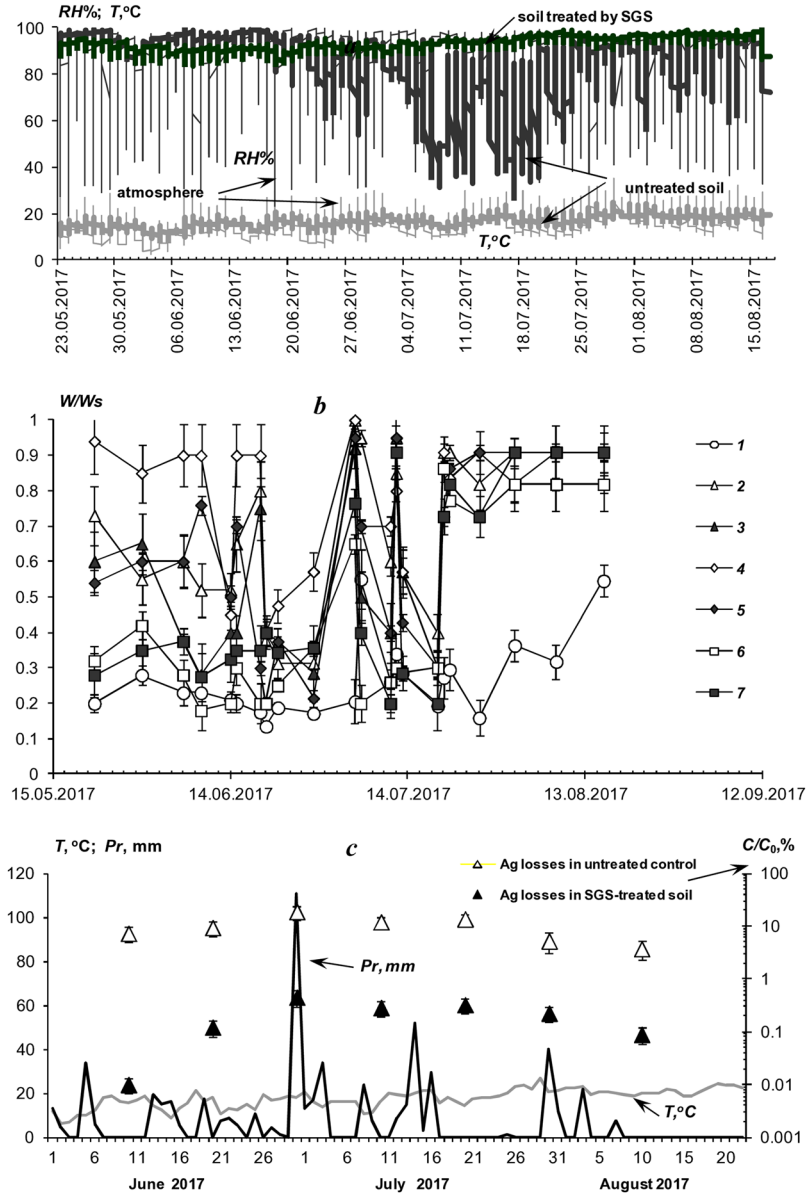


Figure 3. Monitoring of meteorological conditions and soil regimes in the 2017 experiment; (**a**) temperature (*T*) and relative humidity (*RH*%); (**b**) soil *W*/*Ws* index (*W* is soil water content per weight, *Ws* is water content at soil saturation): *1* – untreated control, *2* – CGS A11+Ag ionic, *3* – PGB A22+Ag ionic, *4* – CGS A11+Ag nanoparticles, *5* – CGS A22+Ag nanoparticles, *6* – CGS A11+"Quadris", *7* – CGS A22+"Quadris"; (**c**) daily temperature, precipitation (*Pr*) and lysimetric removal of silver ions from the soil (C/C_0): C_0 is initial silver content in a 30 cm soil layer [g/m^2], *C* is leached silver per decade [g/ m^2].

summer. Ionic silver also had a translaminar effect, which was first proved by a quantitative pointwise (local) analysis of the silver content in tops, tubers, and green berries of potato using non-destructive XRF-technology. This effect delayed the development of late blight of vegetative organs in treatments with ionic silver for a week, compared with the untreated control and the SGS containing silver nanoparticles, apparently not capable of active root uptake and transport within the plant. Scanning layer-by-layer XRF analysis (penetration depth not more than 1 mm) showed silver accumulation only on the surface of the tuber peel (up to 30 ppm), in the absence of more deep penetration, whereas in the potato berries it was distributed almost uniformly. The presence of a protective coating of silver on the surface of the tubers, apparently, should be a significant factor that preserves the tubers from rotting during their storage[24].

Potato growing field experiments with SGS under irrigation (2018). The field experiments that followed in 2018 confirmed the effectiveness of water-accumulating and anti-pathogenic SGS for irrigated potato farming in open and closed (in greenhouse) soil conditions. The main experiment in Uzbekistan, conducted under 100% furrow irrigation, showed that the average harvest at the untreated control of 58.8 ± 7.3 t/hct was

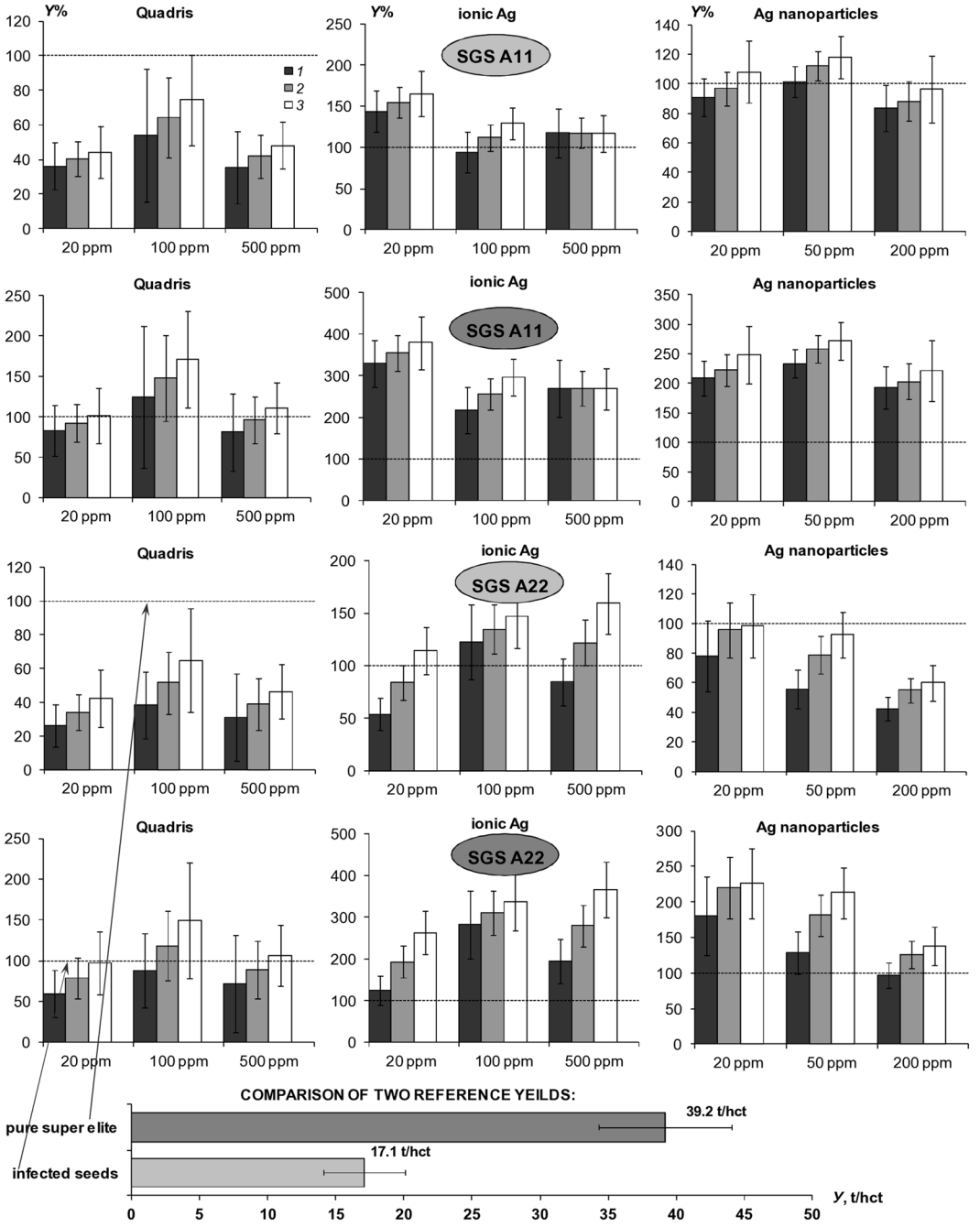


Figure 4. Comparison of the results of potato yields under the influence of SGS (2017 experiment); SGS dozes per potato bush: *1* – 1.0 l, *3* – 0.5 l, *3* – the average yeld between *1* and 2.

close to the potential of the Gala potato variety (60 t/hct). However, a two-fold decrease in irrigation was accompanied by a sharp decline in potato yields of the untreated control. The SGS application significantly increased the yield by 6.9–9.5 t/hct (Fig. 5a), as well as the height of potato bushes, size, weight, and in some cases – the density of tubers, what may be associated with a starch accumulation. The growth of the Gala potato variety also corresponded well to the logistic model (5) with the parameters: $b = 0.21–0.35$ day^{-1}, $T_{0.5} = 14–21$ days, $H_{max} = 43–47$ cm, $D_{max} = 31–38$ cm. Large doses of hydrogels (1.0 l), as in the previous experiment, slowed the germination of tubers and the rate of further growth of potatoes with a difference in $T_{0.5}$ of 3–6 days. The SGS options under 100% and 50% furrow irrigation treatments did not show a statistically significant difference from each other in yield (Fig. 5a). That is, an additional 50% saving of the irrigation water does not lead to a decrease in potato productivity. Matrix PCR diagnostics did not reveal the presence of any potato pathogens in tubers protected by the SGS, while the following bacteria were detected in untreated control: *Pectobacterium atrosepticum) and Pectobacterium carotovorum subsp*. A comparative analysis of atmospheric monitoring data (more than 1000 measurements with an interval of 2 hours) showed extreme changes in temperature from 3.6 to 55 °C and

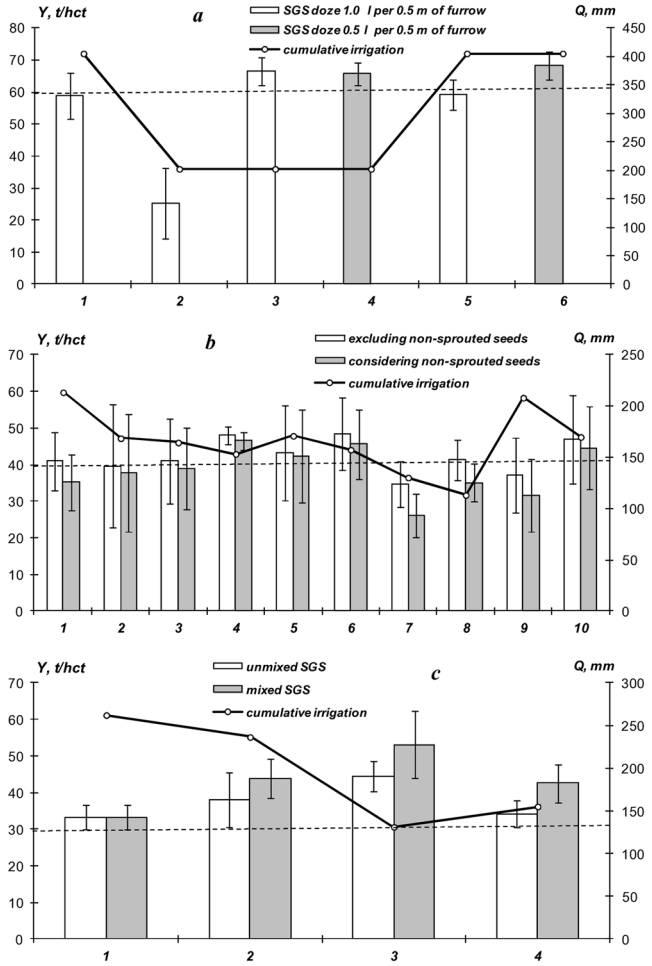


Figure 5. Comparison of the results of potato yields under the influence of SGS and irrigation (2018 experiments); (**a**) furrow irrigation in Uzbekistan: *1, 2* – untreater control 100 and 50% irridation; *3, 4* – A22Ag SGS 50% irrigation; *5* – A11 SGS 100% irrigation, *6* – A22Ag SGS 100% irrigation; (**b**) sprinkler irrigation in Krasnodar: *1* – untreater control, *2-6* – A22 SGS 1.0 and 0.5 l per bush without and with mixing, *7-10* – same for A11 SGS; (**c**) drip irrigation in Moscow: *1* – untreater control, *2* – A22 SGS+"Quadris" 50 ppm, *3* – A22 SGS+Ag ionic 100 ppm, *4* – A22 SGS+Ag nanoparticles 100 ppm.

relative humidity from 12 to 98.5%, during the whole experiment. In the uppermost 5 cm of the soil layer, temperature fluctuations during the season amounted to an amplitude of 13.1–40.6 °C, and *RH*% values of 58–100%. The average seasonal values of temperature and relative humidity in the atmosphere were equal to 23.2 ± 9.4 °C; 42.6 ± 20.4%, and in the rhizosphere $T = 24.1 \pm 5.5$ °C; $RH\% = 75.1 \pm 32.4\%$, indicating more favorable conditions for potato growth than previous trials in a humid climate. The index of air-water regime on the untreated control often diagnosed the state of overwetting, while when using the SGS mixed with the soil, the value of W/Ws was more often within the optimum range, not exceeding 0.9 (lack of air) and not falling below 0.3 (lack of moisture). When the SGS was uniformly spread at a dose of 1.0 l per bush and under 100% irrigation treatment, overwetting of the root zone often occured. However, the tubers did not rot due to the strong potential evaporation and the high transpiration activity of plants.

Additional experiments carried out in closed ground with sprinkling and drip irrigation in conditions of the Krasnodar region and the Moscow region also allowed us to achieve the planned yield with 30–50% savings in irrigation water (Fig. 5b). The experiments were carried out under similar temperature conditions (ranges of temperature variation from 4.1 to 43.6 °C with an average value of 21.1 ± 8.8 °C in Moscow and from 13.0 to 41.0 °C with an average value of 23.4 ± 5.5 °C in Krasnodar), however in completely different conditions in regards to air humidity, which sets the transpiration of water. In the Moscow greenhouse with automatic ventilation, relative humidity varied from 20 to 100% with an average value of 80.4 ± 23.7%, and in the Krasnodar glasshouse, a closed type, it was always near the saturation state (variation 84.7–100% with an average value of 93.4 ± 3.7%). As a result, in the Moscow experiment with drip irrigation in a ventilated greenhouse, the germination of tubers and further growth occurred without any delay. The growth rate of the vegetative mass according to the Verhulst-Pearl model (5) was characterized by typical values of $T_{0.5} = 26$–32 days, slightly higher than in the Uzbek experiment, apparently as a result of shorter daylight hours. Other growth parameters ($b = 0.15$–0.22 day^{-1}, $H_{max} = 38$–66 cm, $D_{max} = 34$–58 cm) characterized a more intensive growth of the tested Red Scarlett potato

variety in the greenhouse compared to last year's cultivation of the same variety in open ground and atmospheric precipitation.

In the Krasnodar experiment, the growth of vegetative mass was accompanied by a significant delay ($T_{0.5} = 38–60$ days), despite the resultant plant size ($H_{max} = 37–65$ cm, $D_{max} = 31–52$ cm). We interpret this to be a result of a decrease in transpiration activity and the associated photosynthetic rate due to constantly high air humidity of the unventilated glasshouse. This situation is confirmed by direct monitoring of the index of water-air regime of the soil, that for the rhizosphere layer in the untreated control, and in the case of hydrogel compositions with uniform application without mixing, almost constantly exceeded the value of 0.9, indicating overwetting. Only SGS treatment using the amphiphilic composition A22 at a dose of 0.5l per potato bush with obligatory mixing with the soil was characterized by the best values of the *W/Ws* index, which are, as a rule, in the optimum range for the loamy chernozem: $0.3 < W/Ws < 0.9$. Most likely, this was due to the loosening and structuring effect on the soil by the new composition with amphiphilic filler. Overwetting of chernozem in some cases led to rotting and loss of tuber germination (untreated control, the SGS A11 treatment with uniform application) and to the development of pathogens (*Phytophthora infestans, Pectobacterium atrosepticum, Clavibacter michiganensis subsp. sepedonicus*), that affected 2–5% of potato tubers, according to matrix PCR diagnostics. In the amphiphilic A22 SGS treatment, regardless of the dose (0.5, or 1.0 liter per bush), the method of application (uniform or with mixing) and the rate of irrigation (50 or 100%), as well as in the hydrophilic A11 SGS treatment when applied with mixing, the fresh yield did not contain any pathogenic organisms, despite the presence of pathogen DNA (*Clavibacter michiganensis subsp. sepedonicus, Pectobacterium atrosepticum*) in the tubers of the Lady Claire potato variety as an original planting material. The average yield on the untreated control (41.0 ± 8.0 t/hc) reached the potential of the Lady Claire potato variety (40 t/ha). However, it experienced strong fluctuations, and taking into account the fraction of the area on which the plants did not sprout, it was significantly lower: (35.3 ± 7.6 t/hc). Overwetting of chernozem was most negatively affected in plots with the hydrophilic composition A11, where in a number of cases the actual yield fell to a level of 26–31 t/ha. The A22 SGS treatment with amphiphilic filler was better, and here the average yield was stably higher than on the untreated control, reaching 46–48 t/ha in the options of mixing the gel with the soil (Fig. 5b).

In the Moscow experiment with the cultivation of the Red Scarlett potato variety under automated drip irrigation and ventilation of the greenhouse we obtained more effective results of crop production increase (Fig. 5c). The SGS appears to have the greatest effect in coarse-textured soils, where the initial water retention and nutrient absorption capacity are much lower than in loamy chernozems and serozems. The yield on untreated control plots (33.3 ± 1.6 t/hct) was significantly higher than the predicted level of 30 t/ha for the Red Scarlett potato variety and the options with hydrogels consistently exceeded the untreated control, reaching a 30–60% yield increase. The best results (the potato crop from 38.0 ± 7.5 to 53.1 ± 9.1 t/hct) were again demonstrated by the SGS based on the new A22 gel with an amphiphilic filler, "Quadris" synthetic fungicide (50 ppm) or ionic silver (100 ppm) as a PPP. Mixing the gel structures with the soil increased an average yield by 5–8 t/hct, but this increase was often not statistically significant, considering the large variation in yield on these plots (confidence intervals of 5–9 t/ hct at $p = 0.01$ significance level). Owing to a fully automated drip irrigation system with the ability to adjust through timers the amount of water supplied, it was possible to achieve water savings for all plots with the SGS treatments (Fig. 5c). In the "economical irrigation" options, this decrease reached 1.7–2-fold differences compared to the untreated control, that is, saving up to 50% of irrigation water not only without any damage to productivity, but also with a significant increase. This result is explained by high (50% or more) unproductive losses of irrigation water through intensive infiltration and surface evaporation in coarse-textured soils[6]. These losses are completely blocked by SGS in the rhizosphere during local drip irrigation of each potato bush. Comparative monitoring of the air-water regime index showed that it was mainly within the optimal range for sandy soils ($0.15 < W/Ws < 0.9$), and only the uniform (without mixing with soil) SGS application occasionally exceeded this range. Matrix PCR diagnostics did not reveal any pathogenic organisms either in the untreated control, or in plots with the SGS treatment, which can also be explained by good quality of seed material (harvest 2017 from experimental plots with our protective rhizospheric compositions).

PPP leaching field experiment. A field study of the acrylamide leaching from the soil, as a possible product of biodegradation of acrylic hydrogels, clearly shows that this factor can be neglected due to the insignificance of such losses[29]. A direct lysimetric analysis of the leaching of silver ions carried out in the extremely wet year of 2017 did not reveal any significant losses from the SGS. The total seasonal losses with the infiltration runoff from the soil monolith treated by the SGS amounted to less than 1–2% of ionic silver contained in the composition (Fig. 3c). As opposed to the leaching of the same doses of silver in the untreated control without SGS was quite significant (up to 70% of the initial amount introduced into the rhizosphere in the form of dry silver nitrate). However, an alternative method for estimating the removal of silver from the rhizosphere, using an analysis of the dynamics of Ag reserves in a 30 cm soil layer over a three-year period (2017–2019), showed the possibility of more intense losses compared with the data of the lysimetric analysis. In the plots treated with SGS, the total losses were 5–8% of the initial amount of silver in the rhizosphere. It can be explained by the duration of the leaching process with nearly 5-fold excess of a direct lysimetric experiment (three months). An additional explanation includes the absorption of silver by vegetation, which is confirmed by non-destructive XRF-diagnostics of tubers, green berries and vegetative potato phytomass. One more hypothesis is the effect of preferential fluxes that are absent in small lysimeters, but quite probably can appear in large plots with sandy soils[30]. All these hypotheses should be studied in the future, however, it is now clear that the losses of PPP from the SGS is significantly (at least 30 times) less than from untreated soil, and they cannot cause any great damage to the environment.

Conclusions

A new type of acrylic hydrogels filled by amphiphilic agents (humates, dispersed peat), silver ions, nanoparticles, and organic fungicide is an effective approach to optimizing the edaphic properties and anti-pathogenic protection of the rhizosphere. The use of synthetic gel structures in sustainable potato farming for the first time made it possible to reliably protect the soil and tubers from the most common of potato pathogens, including *Phytophthora infestans*, to obtain significant (up to 6–15 t/ha) increases in yields, and in the case of irrigation, to achieve 1.3–2-fold water savings. Synthetic gel structures reliably fix plant protection products in the soil, protecting them from leaching, which allows us to recommend these effective carriers for modern agrochemical delivery systems.

Data availability

The datasets analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Received: 1 October 2019; Accepted: 20 November 2019;
Published online: 09 December 2019

References

1. Akelah, A. Novel utilizations of conventional agrochemicals by controlled release formulations. *Mater Sci Eng C* **4**, 83–98, https://doi.org/10.1016/0928-4931(96)00133-6 (1996).
2. Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L. & Fraceto, L. F. Applications of controlled release systems for fungicides, herbicides, acaricides, nutrients, and plant growth hormones: a review. *Adv Sci Eng Med* **6**, 373–387, https://doi.org/10.1166/asem.2014.1538 (2014).
3. Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Fraceto, L. F. & Singh, B. Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals. *Agron. Sustain. Dev.* **35**, 47–66, https://doi.org/10.1007/s13593-014-0263-0 (2015).
4. Smagin, A. V. *et al*. Biodegradation of Some Organic Materials in Soils and Soil Constructions: Experiments, Modeling and Prevention. *Materials* **11**(10), 1889: 1–22, https://doi.org/10.3390/ma11101889 (2018).
5. van der Linden, A. M. A. *et al*. Evaluation of the 2006 proposal for risk assessment of persistence of plant protection products in soil. RIVM Report 601712002/2008. https://www.rivm.nl (2008).
6. Smagin, A. V. & Sadovnikova, N. B. Creation of Soil-Like Constructions. *Eur. Soil Sci.* **48**, 981–990, https://doi.org/10.1134/S1064229315090100 (2015).
7. Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R. & Petersen, P. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agron. Sustain. Dev.* **32**, 1–13, https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6 (2012).
8. Smagin, A. V. *et al*. Fungicidal and antibacterial activity of the hydrogel compositions with silver. *Int. J. of Eng. & Techn* **7**, 4–20, https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11874 (2018).
9. Ali, M. *et al*. Inhibition of *Phytophthora parasitica* and *P. capsici* by Silver Nanoparticles Synthesized Using Aqueous Extract of *Artemisia absinthium*. *Phytopathology* **105**, 1183–1190, https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-15-0006-R. (2015).
10. Krutyakov, Y. *et al*. Tallow amphopolycarboxyglycinate-stabilized silver nanoparticles: new frontiers in development of plant protection products with a broad spectrum of action against phytopathogens. *Materials Research Express* **3**, 1–8, https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/7/075403 (2016).
11. Smagin, A. V. Column-Centrifugation Method for Determining Water Retention Curves of Soils and Disperse Sediments. *Eur. Soil Sci.* **45**(4), 416–422, https://doi.org/10.1134/S1064229312040126 (2012).
12. Smagin, A. V. Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids. *Colloid J.* **78**, 391–396, https://doi.org/10.1134/S1061933X16030170 (2016).
13. Smagin, A. V. About Thermodynamic Theory of Water Retention Capacity and Dispersity of Soils. *Eur. Soil Sci.* **51**, 782–796, https://doi.org/10.1134/S1064229318070098 (2018).
14. van Genuchten, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc. Am. J.* **44**, 892–898 (1980).
15. Sadovnikova, N. B., Smagin, A. V. & Sidorova, M. A. Thermodynamic Assessment of the Effect of Strongly Swelling Polymer Hydrogels on the Water Retention Capacity of Model Porous Media. *Eur. Soil Sci.* **47**, 287–296, https://doi.org/10.1134/S1064229314040061 (2014).
16. Voronin, A. D. Energy Concept of the Physical State of Soils. *Eur. Soil Sci.* **23**, 7–19 (1990).
17. Vasenev, V. I. *et al*. Urban Soil's Functions: Monitoring, Assessment, and Management. In: Rakshit A., Abhilash P. C., Singh H. B., Ghosh. S. (eds.) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer, Singapore, pp 359–409. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5 (2017).
18. Lamsal, K. *et al*. Application of silver nanoparticles for the control of Colletotrichum species *in vitro* and pepper anthracnose disease in field. *Mycobiology* **39**, 194–199, https://doi.org/10.5941/MYCO.2011.39.3.194 (2011).
19. De Lucca, J. *et al*. Silver enhances the *in vitro* antifungal activity of the saponin, CAY-1. *Mycoses* **54**, e1–e9, https://doi.org/10.1111/j.1439-0507.2009.01811.x (2011).
20. Kim, S. W. *et al*. Antifungal effect of silver nanoparticles (AgNPs) against various plant pathogenic fungi. *Mycobiology* **40**, 53–58, https://doi.org/10.5941/MYCO.2012.40.1.053 (2012).
21. Pulit, J., Banach, M., Szczygłowska, R. & Bryk, M. Nanosilver against fungi. Silver nanoparticles as an effective. *Acta Biochimica Polonica* **60**, 795–3, https://doi.org/10.18388/abp.2013_2060 (2013).
22. Ouda, S. M. Antifungal Activity of Silver and Copper Nanoparticles on Two Plant Pathogens, Alternaria alternata and Botrytis cinerea. *Res. J. of Microbiology* **9**, 34–42, https://doi.org/10.3923/jm.2014.34.42 (2014).
23. Rai, M. K., Deshmukh, S. D., Ingle, A. P. & Gade, A. K. Silver nanoparticles: the powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *J. of Applied Microbiology* **112**, 841–852, https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x (2012).
24. Ratte, H. T. Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: A review. Environ. *Toxicology and Chemistry* **18**, 89–19, https://doi.org/10.1002/etc.5620180112 (1999).
25. Jiang, H. S., Li, M., Chang, F. Y., Li, W. & Yin, L. Y. Physiological analysis of silver nanoparticles and $AgNO_3$ toxicity to Spirodela polyrhiza. Environ. *Toxicology and Chemistry* **31**, 1880–1886, https://doi.org/10.1002/etc.1899 (2012).
26. Langdon, K. A., McLaughlin, M. J., Kirby, J. K. & Merrington, G. Influence of soil properties and soil leaching on the toxicity of ionic silver to plants. Environ. *Toxicology and Chemistry* **34**, 2503–2512, https://doi.org/10.1002/etc.3067 (2015).
27. Schlich, K., Klawonn, Th, Terytze, K. & Hund-Rinke, K. Effects of silver nanoparticles and silver nitrate in the earthworm reproduction test. Environ. *Toxicology and Chemistry* **32**, 181–187, https://doi.org/10.1002/etc.2030 (2013).
28. Johnson, M. S. Effect of soluble salts on water absorption by gel-forming soil conditioners. *J Sci Food Agric* **35**, 1063–1066, https://doi.org/10.1002/jsfa.2740351004 (1984).
29. Lentz, R. D., Andrawes, F. F., Barvenik, F. W. & Koehn, A. C. Acrylamide monomer leaching from polyacrylamide-treated irrigation furrows. *J. Environ. Qual.* **37**, 2293–2298, https://doi.org/10.2134/jeq.2007.0574 (2008).
30. De Rooij, G. H. *Preferent flow in water-repellent sandy soils*. Doct. thesis. Wageningen Agricultural Univ. Netherlands (1997)

Acknowledgements
This work was supported by the Russian Scientific Foundation, project no. 16-16-04014. The authors sincerely thank PhD Anna Paltseva and MSci Jone Naujokaityte (CUNY, USA) for the assistance in spelling and technical preparation of the manuscript.

Author contributions
A. Smagin: the main idea of the study, gel structures obtaining, thermodynamic analysis of their water retention and dispersity, computer modeling, organization of field tests and environmental monitoring, mathematical processing of results, preparation of manuscripts and figures; N. Sadovnikova: assessment of hydraulic conductivity, monitoring of water-air regime, statistical processing of results; M. Smagina: microbiological analysis, morphometry of phytomass, organizational support of pathogenic diagnostics.

Competing interests
The authors declare no competing interests.

Additional information
Correspondence and requests for materials should be addressed to M.S.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

© The Author(s) 2019

ISSN 1064-2293, Eurasian Soil Science, 2015, Vol. 48, No. 9, pp. 981–990. © Pleiades Publishing, Ltd., 2015.
Original Russian Text © A.V. Smagin, N.B. Sadovnikova, 2015, published in Pochvovedenie, 2015, No. 9, pp. 1112–1123.

ON THE CENTENNIAL ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF G.V. DOBROVOL'SKII

Creation of Soil-Like Constructions

A. V. Smagin[a, b, c] and N. B. Sadovnikova[a]

[a] *Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*
[b] *Institute of Ecological Soil Science, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*
[c] *Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Sovetskaya 21, Uspenskoe, Moscow oblast, 143030 Russia*
e-mail: smagin@list.ru

Received August 15, 2015

Abstract—An innovative approach for artificial soil construction is briefly characterized, and its basic principles are given. The major kinds of soil constructions and materials used for their creation are discussed. Quantitative aspects of the formation of layered soil constructions for irrigation farming and greening of urban areas under high anthropogenic loads are examined. Technological design of these constructions is based on modeling energy and mass fluxes in soil systems with the use of HYDRUS-1D software. Technological approaches for the application of biopolymer materials into different soil layers with the aim to increase the soil water capacity, protect the soils from secondary salinization and contamination with water-soluble pollutants, and improve the resistance of these materials toward biological destruction are discussed. The tests of the layered soil constructions in some countries of the Persian Gulf and in Moscow have proved their high efficiency. The productivity of green plantations can be increased by 1.5–2 times owing to the increased efficiency of water consumption and protection of the root zone from soluble salts under conditions of the natural or technogenic salinization (contamination) and deficit of precipitation.

Keywords: soil constructions, technological modeling, biopolymer materials, water-retention capacity, biological productivity, secondary salinization, technogenic contamination

DOI: 10.1134/S1064229315090100

INTRODUCTION

Soil science has gained the status of a fundamental natural science recognized in academic and university circles owing to the activity of academician G.V. Dobrovol'skii, who would have been 100 this year. He was an excellent organizer and a talented scientist with high creativity, encyclopedic knowledge, and keen scientific intuition. Dobrovol'skii actively contributed to the development of a fundamental structural-functional direction in the study of soils as dynamic bio-abiotic systems with complex structure and as components of biogeocenoses and the entire biosphere. The concept of the ecological functions of soils and their role in the biosphere and human life developed by Dobrovol'skii and Nikitin [8] is one of the most significant results of this activity. This concept attracts great attention not only among soil scientists but also among the society in general, because it clearly shows an indispensable role of soils in sustaining life on our planet. Dobrovol'skii clearly understood the high vulnerability of soils as dynamic natural formations under intensive anthropogenic loads, and he did not consider soil management as a simple regulation of the negative anthropogenic effects and soil conservation measures. As a creative thinker, he was aware of the fact that a better understanding of the laws of the development of bio-abiotic bodies would help us to manage properly their properties and functions; moreover, this knowledge would help us to create artificial soil constructions with required characteristics on the basis of modern technologies.

This direction in soil science can be referred to as soil construction. In Russia, it was initiated at the Department of Soil Physics and Soil Reclamation of the Faculty of Soil Science [15, 18, 20, 22] and at the Institute of Ecological Soil Science of Moscow State University [16, 30] under the leadership of Dobrovol'skii. In this paper, methodological and technological data on soil construction obtained in the past two decades are summarized.

THE CONCEPT AND TYPES OF SOIL CONSTRUCTIONS

Soil construction is an innovative branch of engineering ecology, soil science, and agriculture. It is aimed at the scientifically based design and creation of a system of working layers (horizons), communications, barriers, and other constructive elements in soils. For this purpose, modern technical means and natural and artificial materials are applied. The layers are created for the optimization of the properties, regimes, and ecological functions of soils in anthropogenic landscapes. The materials of different kinds are used for this purpose: natural and modified organic and organomineral substances (peat and peat–sapropel soil

modifiers, humates, composite composts, sewage sludge, zeolitic complexes, etc.), synthetic polymer hydrogels (SPHs) and films, hydrophobic silicon–organic compounds, geotextile, and plastic and gabion items for soil-ameliorative and geo-stabilizing constructions [1–4, 17, 16, 27].

Summing up available data, the following grouping of soil constructions created by humans "by hand" or with the use of technical means can be suggested [16]:

(i) agricultural artificially constructed soils,

(ii) soil constructions of sports grounds,

(iii) technical geostabilization constructions,

(iv) technical soil-reclamation constructions, and

(v) water-accumulative salt-protective soil constructions in arid and urban areas.

Agricultural artificially constructed soils are usually created for hundreds of years [7, 16]. This kind of artificial soils corresponds to Anthrosols (according to the international classification) and includes old-irrigated soils in river valleys and rice plantations, filled kheilutu soils in China, plaggen soils of northern Europe, artificial soils of the Valaam and Solovki islands, and other highly cultivated soils of gardens [21]. They were mainly created via application of organic substances, associated materials, and fertilizers to improve the quality and fertility of the initial soils. Human activity and natural factors resulted in the formation of thick (>30 cm) humus-accumulative and organic horizons storing considerable reserves of moisture and nutrients to ensure high and sustainable crop yields. These soils are created by humans in compliance with the natural biogenic regularities, which ensures their high stability and efficient functioning.

A specific place in this group of agricultural soils is occupied by soil constructions of the so-called structurally reclaimed soils of drained peatlands. Contrary to the mineral substrates of human-made soils, the content of organic matter in the organic deposits is very high, and the efforts of farmers are aimed at its preservation; enhancement of humification processes; and soil protection from erosion, mechanical impact of tillage tools and field machines, and microbial destruction. For this purpose, three technological approaches are used: mixed sanding (which is usually applied in northern regions), layered mixed sanding, and surface sanding (the Rimpau system) [2, 9]. The application of specific technical means makes it possible to perform earth works in great volume and shortens the period of the formation of the functional layers necessary under given conditions.

Soil constructions of sports grounds (soccer fields, tennis courts, golf courses, rugby fields, race tracks, and other objects) have been described in a number of works [5, 10, 23–26]. They include several artificial mineral layers (from two to five); underground communications for irrigation, drainage, and heating; and an organomineral fertile surface layer. All the layers together comprise a complicated natural–anthropogenic soil-like body [10]. Natural substrates represented by residual soil horizons are involved in its functioning. The soil body is differentiated into contrasting layers with different textures. That is why the parameters of migration of moisture and dissolved substances and, thus, the phytoproductivity of these soils may differ greatly from the projected ones. A feasibility study with the use of modern hydrophysical models is required for such complicated objects because they are expensive and important, and thus should not be designed by the trial-and error method [16].

The most important factors affecting the stability of sports lawns include mechanical loads, the water–air and temperature regimes, and agrochemical loads. The mechanical impact exerted by sportsmen (for 40–60 and more hours per month) on the grass cover and biogenic horizon of soil construction in the periods of trainings and competitions cause their inevitable degradation. The effect of irrigation is also considerable. Its rates are not scientifically substantiated, which often results in the strong excessive moistening of the biogenic layer of the constructions of sports lawns. For example, irrigation of the training field of the Spartak club (Moscow oblast) results in its additional supply with 1500 mm of water per year [10], which is more than two times higher than the mean annual rainfall in this region and can be compared to humid subtropics and tropics.

Irrigation and artificial heating favor the activation of microbiological and biochemical weathering and create favorable conditions for the migration of soil solids and leaching of nutrients from the organomineral horizons. Mineral fertilizers should be applied for nutrient replenishment. Nevertheless, the rates of nitrogen, potassium, and combined fertilizers applied to sports lawns are often very high (1–3 t per season [10]), which exceeds the demands of the lawn grass by two–three times. It should be mentioned that for the 10- to 15-cm-thick root zone, annual application of 2–3 t/ha of mineral salts is similar to the salt content of 0.1–0.2%, or to 3–4 g/L of total dissolved salts, or to the electrical conductivity of the soil solution at about 4–6 dS/m [16]. Therefore, a slight or even medium salinization typical of arid regions can be created within a year upon application of fertilizers at such a high rate.

Application of earthy materials and sand is often used to construct the soils of sports fields. In essence, this technology is similar to that applied during structural reclamation. It ensures the rise in the productivity of plants and their tolerance towards external impacts, including mechanical impacts by field machines and sportsmen. It also favors the reduction of evaporation and decreases the rate of decomposition of the organic matter (detritus) of peat and sod of the lawn [16]. These advantages of the method permit us to recommend it not only for sports grounds but also for other kinds of the municipal lawns, especially those formed on thin peat and peat–sand layers of primitive constructozems (artificially constructed soils). A regular application of new portions of sub-

strate to the soil construction is a necessary measure of the lawn maintenance included in recommendations on the protection of the lawns in Moscow [13].

Geostabilization soil constructions are aimed at stabilization of the soil surface and prevention of water and wind erosion, taluses, landslides, surface subsidence, and other negative processes [16]. Gabion constructions filled with stony material are one of the most efficient ways for slope fixation. Various biological mats and bio-textiles are used for the creation of fertile layers in special technical constructions, which may be settled by plants. A combination of the abovementioned materials and technologies with local natural materials (such as soil, subsoil, gravels, and stones) and the methods of soil fixation by vegetation are usually used in modern geostabilization constructions [16].

Artificial soil constructions based on geogrids filled with mineral and organomineral mixtures are widely applied. Bordering from the sides makes them stable upon surface loads and shearing stress (for example, a GEOWEB cellular confinement system [27]). Though the engineering aspect of these constructions (the problem of the structure strength and fixation on the soil surface) is comprehensively studied, the volumes of the web filler (fertile soil and ground) are not calculated, though it is very important. As a result, the vegetation growing in such constructions is often suppressed or even dies during droughts. The cells are thin (10–15 cm) and are underlain by the coarse material (crushed stone and sand) with a low water retention capacity, and the plants suffer from the lack of space and moisture [16].

Special **isolation soil constructions** are used to reclaim the sites with contaminants and wastes, e g., former landfills [19]. These constructions represent a combination of isolating and filtering layers that collect and divert water solutions from the landfills and condensed moisture. They also isolate the landfill from the groundwater and atmospheric precipitation via their discharge into the drainage network. Protective screens are made of natural materials (sand, gravel, crushed stone, clay, bentonite, and their mixtures) in combination with geo-synthetic materials (synthetic blanket insulation, geomembranes, geotextile, bentonite mats, and other geocomposite materials). Protection from gas emissions is also very important. First of all, this concerns methane formed in the landfill body upon the anaerobic destruction of the organic components of solid wastes.

Engineering soil reclamation constructions are mainly represented by drainage systems. Contrary to the above-discussed groups, drainage constructions are designed on the basis of rather rigorous calculation. Data on the particle-size distribution and water and physical properties (filtration coefficient, bulk density, porosity, and water retention) of the soils are taken into consideration. Most of such projects were designed for large areas of agricultural or forest lands [9], and adequate methods were developed for this purpose. At present, there is high demand for individual drainage systems for small land plots with houses, damp-proofing of basements, and similar objects. The methods of their construction are not sufficiently elaborated in Russian soil physics and soil reclamation.

In addition to the soil drainage constructions, various kinds of plane engineering constructions (channels, terraces, levees, and dams) are also used in order to prevent the excessive moistening and water erosion. They are often arranged as cascades and are aimed at catching and diverting the surface runoff formed upon heavy rains or snow melting into natural or man-made (storm sewage system) collectors. Design calculations concern their geometric parameters and the maximum possible amount of water flowing to a particular area or derived from the surrounding area per a particular time [1, 16].

The design of **water-accumulative salt-protective layered soil constructions** is based on the original models of the structural-functional soil organization. The investigations were started in 1995 as a part of the Green Wave Russian–Arabian project. The aim of the project was to create green plantations on the municipal lands in Dubai (United Arab Emirates). Bio-polymer materials (peat soil modifiers and strongly swelling hydrogels) were supplied by Russia [15]. Since 2005, the Faculty of Soil Science and the Institute of Ecological Problems of Moscow State University have been actively involved in the second AridGrow joint project. The technological solutions have been tested in Bahrain, Qatar, Jordan, and some other countries of the Arabian Peninsula [16, 30].

This group of soil constructions may be conventionally specified into continuous (under grass vegetation) and local (under trees and bushes) constructions. The main engineering concept of the constructions consists of the formation of a system of particular functional layers (horizons) imitating the natural structural-functional organization of soils. Each layer performs its specific bioresource-accumulative or protective functions. The materials used in the systems include organic soil modifiers based on natural and synthetic biopolymers and on local soil materials. One or two accumulative layers are created in the root zone. They accumulate moisture and nutrients necessary for plants. The layers are made of the natural mineral soil material, peat, and synthetic (hydrogel) biopolymers in various combinations. The deeper part is separated from the topsoil by the coarse-textured screen, which breaks the continuous capillaries, favors additional suspended water retention in the root zone, and protects this zone from the secondary salinization and contamination with water-soluble pollutants transported with ascending flows of capillary moisture. The hydrophysical aspects of the anti-drainage effect on the formation of suspended water in thin accumulative layers underlain by the coarse-textured screen are discussed in [18]. The rates of the applied materials and the parameters of the constructions (the thickness and depth of the layers) are calculated on the basis of the theory of the physical soil status with the use of modern computer models of energy and mass transfer and

the structural-functional organization of soils as dynamic bio-abiotic systems [6, 15, 16, 22, 29]. Some principles of this technological designing and examples of the realized constructions are given below.

METHODOLOGY OF THE TECHNOLOGICAL DESIGN OF SOIL CONSTRUCTIONS

The main aspects of the design of soil constructions with the use of computer models of energy and mass transfer (those similar to HYDRUS [28, 29]) in soils are as follows. The thickness of the calculated soil layer usually does not exceed 1 m (according to the Moscow Soil Act of July 4, 2007 (no. 31), this is the standard thickness). The polyvariant prediction of water behavior and its consumption by the particular vegetation type at the initial stage and after application of particular rates of soil modifiers and formation of one or several accumulative layers at different depths is performed for this layer. For the unirrigated lands, the variant with moisture and nutrient reserve for the period without precipitation in dry years is created via application of the minimum amount of soil modifiers. This reserve is necessary to supply moisture for plant transpiration and maintaining plant productivity.

The second problem is urgent for arid regions and modern megacities of the temperate zone with soils subjected to technogenic contamination and salinization. It is necessary to protect the root zone from these adverse factors and block the rising capillary flows carrying water-soluble pollutants and salts to the surface layer. For this purpose, the protective coarse-textured screen composed of crushed stone and expanded clay (ceramsite) and similar materials is designed under the root zone [16, 30]. Such screens are not included in soil-hydrophysical models because of the lack of the water retention capacity. Therefore, the model may include the soil blocking (reduction of the soil profile) with the use of the lower boundary condition of the free gravitational water outflow (similar to Seepage Face in HYDRUS-1D model [28]). It should be taken into consideration that for continuous soil constructions under grass vegetation (lawns and flower gardens), plant productivity depends on the available edaphic resource [16]. The minimum thickness of the layer which provides stable productivity of grass communities is 40–50 cm. Therefore, the thickness of the soil profile equal to 40–50 cm may be used in soil-hydrophysical models for constructozems with coarse-textured screens to predict the conditions of water supply, if water is freely discharged at the lower boundary. The positions of the layers of soil modifiers of various thicknesses and the particular water retention capacity (WRC) and water conductivity (which may be characterized by filtration coefficient (C_f)) are imitated for the soil profile. The accumulative horizons should also be protected by surface screens—coarse-textured (sand) screens of particular depth—to decrease the rate of biodestruction processes. The thickness of the screen layer is determined by simple nomograms developed on the basis of the models of the organic matter destruction in soils [16].

The potential transpiration typical of the given kind of plantation at the optimum water supply (with due account for temperature) is used as the upper boundary condition [17, 30]. To imitate water uptake by the roots, the distribution pattern of root density in the soil profile is introduced into the model, and the type of vegetation with specific response of the water consumption to its deficiency and to the salt (osmotic) stress is selected from the database. The dynamics of water in the soil profile and the characteristics of water availability for plants, as well as cumulative characteristics of the nonproductive losses (capillary-gravitational discharge) of water from the calculated layer and moisture expenditure for evapotranspiration (with due account for a decrease in transpiration upon the soil drying), are analyzed in the polyvariant calculations.

The WRCs of soil layers (including the layers of soil modifiers) play the leading role in the information support of the models. Various variants of water separation from the solid matrix in the centrifugal and gravitational fields are used for the experimental production of material combinations at a wide range of water contents (from the field capacity to the wilting point) [14, 15]. Examples of the WRCs for the initial soil substrate (medium-grained quartz sand) and its mixture (0.2%) with a strongly swelling polymer hydrogel (SPH) and for the AridGrow peat–sapropel soil modifier [16, 30] are given in Fig. 1. The water retention capacity can be estimated via comparing the equilibrium water contents of the investigated objects at the cross point of the WRC and the line of the water pressure in the 50-cm-high water column corresponding to the 50-cm-thick constructozem above the salt-protective coarse-textured (crushed stone) screen. The water content (analogue of the field capacity) at this point in the initial sandy soil slightly exceeds 2% (0.02 cm^3/cm^3) and increases up to 20–22% after application of 0.2% SPH. After its application to the peat–sapropel soil modifier, the water content at this point reaches 74–75% (0.70–0.75 cm^3/cm^3).

In order to introduce the data on the water retention capacity of soils into the modern systems of computer modeling (the HYDRUS model and similar models), the WRC functions can be approximated by a standard model developed by van Genuchten [22, 28]:

$$\Theta = \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{\left[(1 + (\alpha P)^n\right]^{-m}} + \Theta_r; \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \qquad (1)$$

where P, cm and Θ, cm^3/cm^3 are the capillary-sorption pressure and the volumetric water content in the soil (variables of the WRC); Θ_s and Θ_r are parameters of the water capacity of the soil at the highest (saturation) and lowest permissible (residual) water contents; and α, n, and m are approximation constants depending on the physical properties of the soil materials (particle size, structure, the organic matter content, and others). The approximation can be performed

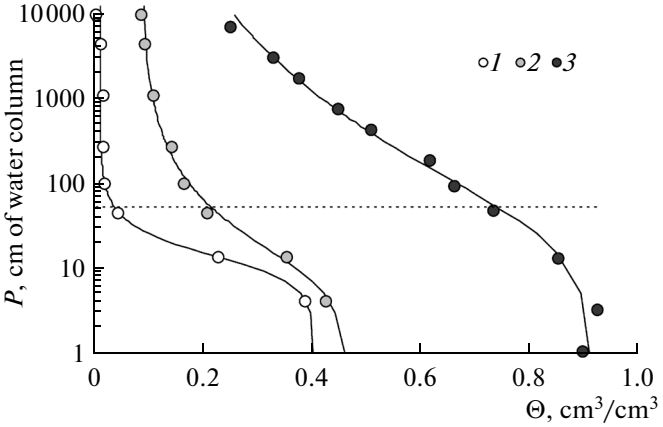


Fig. 1. Water retention curves for the components of the layered soil constructions. Designations: Θ—volumetric water content, *1*—sandy substrate, *2*—0.2% SPH, and *3*—peat–sapropel soil modifier. Dotted line shows hydrostatic pressure of the 50-cm-high water column corresponding to 50-cm-thick soil layer above the crushed-stone screen.

with the use of the S-Plot software (versions 9–11) for the nonlinear functions or with the use of the RETC software (special application to the HYDRUS-1D system) [16]. The WRCs (Fig. 1) joining the experimental points were plotted according to model (1) with the particular parameters given together with data on C_f values.

The selected results of the technological modeling for the investigated soil objects are given in Fig. 2. Application of the accumulative layers made with the use of 0.2% SPH or the AridGrow soil modifier increases considerably (from 5 to 20–80%) the equilibrium water content in the root zone of the constructozem. It is increased not only under conditions of the free gravitational water discharge but also upon the active water uptake by the roots of lawn vegetation with the potential evapotranspiration of 3–4 mm/day. This rise in the water retention and water capacities enlarges the period with sufficient water reserves in the root zone without additional irrigation (or precipitation) from 10–15 days (on sandy substrates) to 30 and 40 days (for one or two 10-cm-thick accumulative layers, respectively) (Fig. 2d, vertical dotted arrows). Water con-

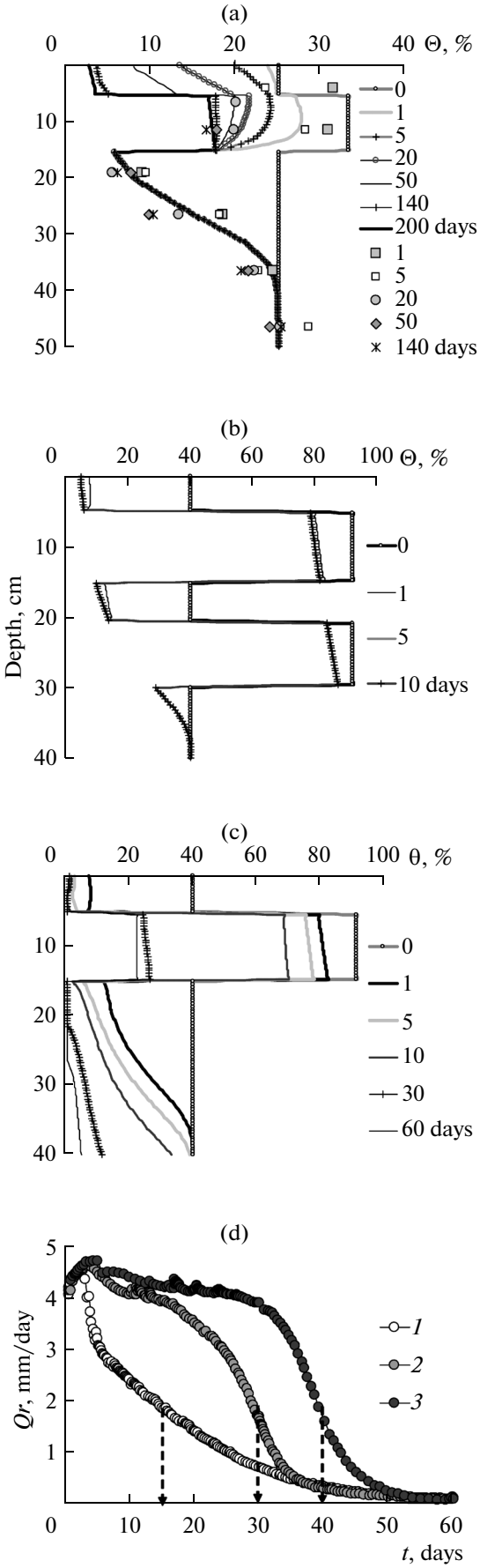


Fig. 2. Technological modeling of the layered water-accumulative soil constructions with the crushed-stone screen with the use of HYDRUS-1D software: Θ—volumetric water content (the regime of free gravitational water outflow after saturation): (a) construction with a 10-cm-thick accumulative layer of 0.2% SPH (experimental data are given by symbols), (b) construction with two layers of the peat–sapropel soil modifier, (c) the same for the regime of water uptake by the roots of lawn grasses, (d) dynamics of water expenditure for transpiration (*Qr*, mm/day) with arrows indicating critical water consumption upon irreversible wilting of the grasses for (*1*) sand, (*2*) one layer of the peat–sapropel modifier, and (*3*) two layers of the peat–sapropel modifier.

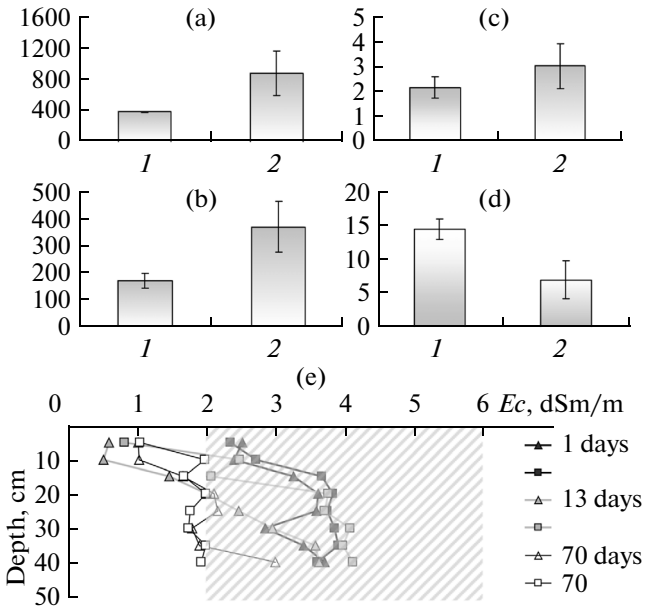


Fig. 3. Experiment on growing green lawns at the station of landscaping and gardening of Dubai (according to [15]): (*1*) control and (*2*) soil constructions; (a) fresh phytomass (g/m^2), (b) absolutely dry phytomass (g/m^2), (c) chlorophyll content (mg/g), (d) irrigation water (L/m^2 day), (e) electrical conductivity (*Ec*) of pore solutions; triangle symbols signify variants with SPH, square symbols signify variants with low-moor peat, and hatching signifies salinization zones.

sumption of 2 mm/day was taken as a critical value (at lower water consumption, lawn grasses suffer from wilting). Prognostic data on the soil water dynamics obtained with the HYDRUS-1D model corresponded well to the experimental data obtained in laboratory for the models of soil constructions (Fig. 2a) [16].

PRACTICAL APPLICATION OF LAYERED SOIL CONSTRUCTIONS

The innovative technologies of soil construction were tested in the field in some Arab countries (United Arab Emirates, Qatar, Bahrain, Jordan) on silty sand arid soils with the use of artificial irrigation and in Moscow [16, 30]. The first example is represented by continuous soil constructions with the layers of low-moor peat and strongly swelling polymer hydrogel under green lawns made at the municipal parks and station facilities in Dubai. The biomass of lawn grasses (hybrid of *Paspalum*) on the soil constructed with the use of the new technology was 2–2.5 times higher in comparison with the control independently from the type of organic matter; the quality of the lawn (as judged from the chlorophyll content) was better (Fig. 3a). Layered application of soil materials made it possible not only to reduce nonproductive losses of the irrigation water with intrasoil runoff by 30–50%, but also to prevent secondary salinization. The monitoring of the salt status of reclaimed lawns via measuring the electrical conductivity (*Ec*) of soil pastes showed that the upper 30-cm-thick soil layer was subjected to desalinization within a relatively short (2–3 months) experimental period (Fig. 3b).

In Bahrain, the continuous soil constructions were tested at the Station of the Ministry of Agriculture and Municipal Economy in Manama (the capital of the state) [30]. Lucerne was the main culture in the experiment. Taking into consideration the requirements of lucerne, the experimental plots were completely flooded with irrigation water. The concentration of the AridGrow soil modifier in the upper 10-cm-thick layer varied from 5 to 10%. The effect of the applied technology was compared with the plots under organic agriculture, where poultry manure was regularly applied to the soil. The background soil of the station was used as a control variant. It represented natural sand sieved in order to remove stones (agricultural sand). In the experimental period, the investigators controlled the productivity of the test crop and the amount of used irrigation water separately for two growing seasons (Fig. 4). Moisture consumption on the constructed soils was almost two times smaller, and productivity varied slightly on all the test plots (20–24 t/ha in winter, 16–18 t/ha in summer, and 36–43 t/ha over the year). In the control variant and on the plots with organic matter application, annual water consumption was 1000 mm (400 mm in winter and 600 mm in summer). On the plots with the layered soil construction, annual water consumption dropped to 500 mm (200 mm in winter and 300 mm in summer) with preservation of the high plant productivity. It can be concluded that the efficiency of water use (calculated as the ratio of productivity to the amount of irrigation water (kg/m^3)) was the highest (6–7 kg/m^3) in the case of the AridGrow technology application; in the control variant and on the plots with organic farming, it was about 3–4 kg/m^3. This saving of irrigation water was already achieved at a small rate of AridGrow (5%), so that the expenses on the material used to store moisture in the soil could be reduced by two times.

In addition to this test, large-scale experiments on tree planting in the restricted area of the Sakhir royal country residence and on landscaping and improvement of the Rawda palace complex and some private villas were performed in the Kingdom of Bahrain. All the experimental data confirmed the advantages of the new system in comparison with the traditional landscaping technologies [30].

The testing of soil constructions was performed in Moscow (contract t PM no. 8/3-66n-10) in Serebryanyi Bor Forest (Western okrug, Krylatskoe district). The following variants of soil constructions designed by technological modeling were tested [16]: (1) the control variant represented by a soddy(urbo)-podzolic loamy sandy cultivated soil; (3) the soil construction with a 10-cm-thick layer of strongly swelling polymer hydrogel VUM-ITKh (0.2%) (patent technology [4]), the initial loamy sandy soil; (5) the initial loamy sandy soil underlain by a 10-cm-thick crushed-stone screen at the depth of 40 cm; (6) a similar construction with a 10-cm-thick

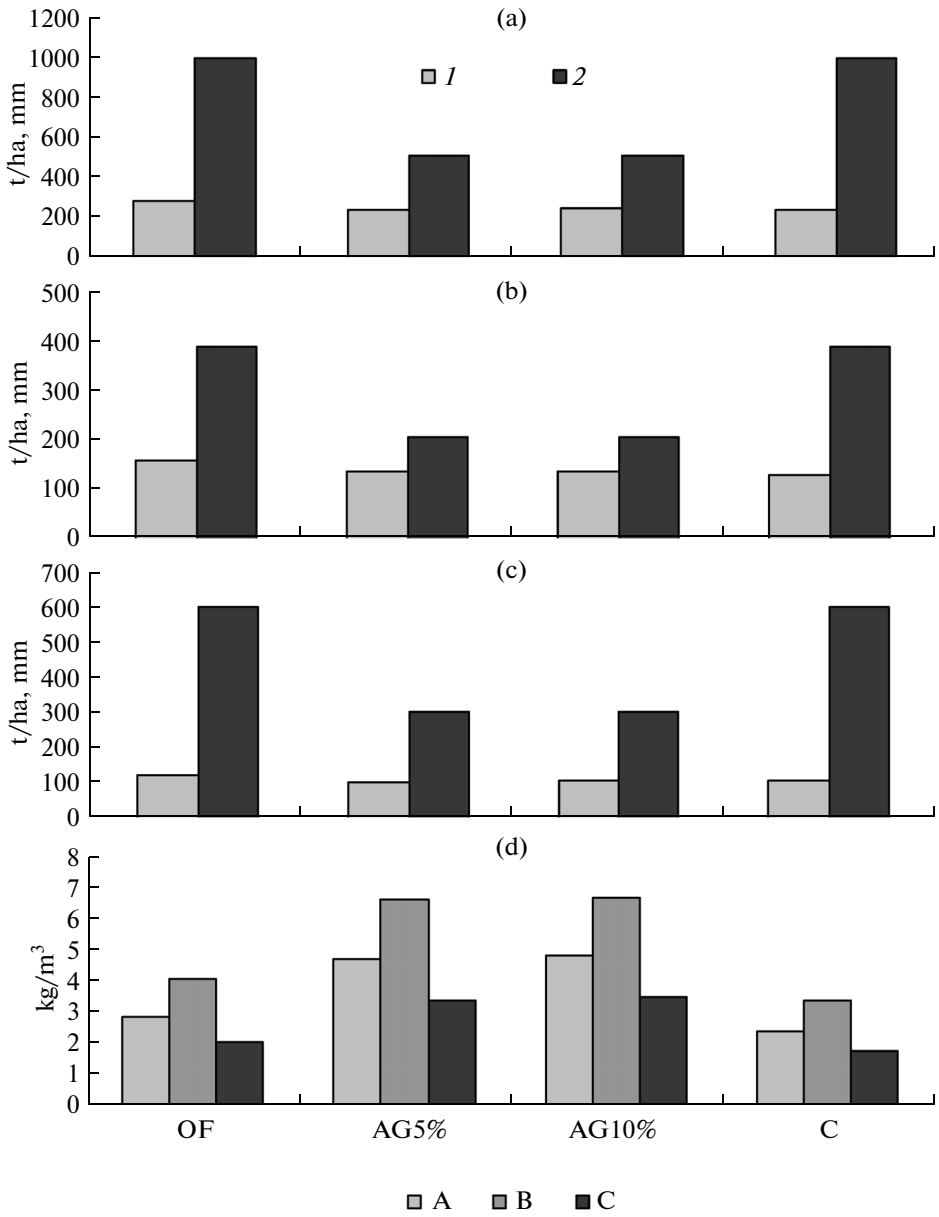


Fig. 4. Experiments on the growing of lucerne at the station of the Ministry of Municipal Economy and Agriculture of Bahrain (according to [35]). Experimental variants: C—control, OF—organic fertilizers; AG5%, AG10%—AridGrow modifier at the rates of 5 and 10%, respectively. Designations: (*1*) lucerne productivity, t/ha, (*2*) water consumption, mm; (a) the entire year, (b) winter, (c) summer, and (d) efficiency of the water consumption, kg/m^3 calculated for the (a) entire year, (b) winter season, and (c) summer season.

hydrogel layer underlain by a 10-cm-thick crushed-stone screen at the depth of 40 cm; (4) the soil construction with a 10-cm-thick layer of low-moor peat covered by a 5-cm-thick layer of the initial loamy sandy substrate; (7) a similar construction with a 10-cm-thick peat layer underlain by crushed stone at the depth of 40 cm; (8) the soil composed of two peat (5-cm-thick (the upper layer) and 10-cm-thick (the lower layer)) in the initial loamy sandy material underlain by the crushed-stone layer; and (2) an additional variant of soil construction with a soluble water-repellent agent (potassium methylsiliconate, SOFEKSIL®-40) produced by the SOFEKS Company (www.sofex.ru) applied to the depth of 20 cm.

The advantages of the elaborated technology are clearly seen in comparison of the artificially constructed soils with the control soil. The water content in the root zone was always higher in the artificially constructed soils. As the water supply was equal, this attests to the efficiency of the applied technologies to improve soil water retention parameters. As was expected, soil modifiers (biopolymers with the high specific surface) applied to the soil increased the water retention capacity and the equilibrium water content

Soil-hydrophysical parameters of the layered constructozems applied in the HYDRUS-1D model (according to [17])

Component	Θ_s	Θ_r	α, cm^{-1}	n	C_f, cm/day
	cm^3/cm^3				
Quartzite sand	0.013	0.406	0.087	2.787	190–480
Sand + 0.2% SPH	0.088	0.468	0.111	1.604	1.5–2.9
AridGrow soil modifier	0.916	0.002	0.038	1.217	480

in the root zone. This effect was enhanced by the break of capillary flows by the crushed-stone screen at the designed depth. Integration of data on the volumetric water content for the entire profile made it possible to estimate the dynamics of water reserves in the soils during the experiment. The lowest water retention capacity and water reserve (150 mm) were typical of the control soddy-(urbo)podzolic soil. The total water reserves increased by 1.2 times in the variant with the water-repellent agent (the cheapest optimization method) and by 1.3 times in the variants with the crushed-stone screen. The 10-cm-thick layer of peat favored an increase in the water reserves by 1.4 times in the control variant and by 1.5 times on the plot underlain by crushed stone. In the construction with two peat layers above the crushed-stone screen, the water reserve increased by 1.7 times in comparison with the control variant and by 1.4 times in comparison with the variant with the crushed-stone screen. The hygrophilous synthetic soil modifier (strongly swelling polymer hydrogel) ensured the most intensive water adsorption. The reserves of water in the loamy sandy soil increased by 1.6 times upon the addition of 0.2% hydrogel and by 1.8 times in the variant with the hydrogel and crushed-stone screen. The water retention of the improved loamy sandy soil corresponded to that in the cultivated loamy soils.

Plant productivity is directly related to the reserves of soil moisture used for transpiration and photosynthesis with water photolysis. Thus, it could be expected that the increased water reserves in the artificially constructed soils should result in a better development of the lawn biomass. The prognostic productivity of the lawns was estimated at 3–5 t/ha of phytomass. Despite the extreme climatic conditions in summer 2010, this level was achieved on the plots with soil constructions within a month of the experiment (Fig. 5). The lawn productivity (dry phytomass) in the control variant did not exceed 1.1–1.2 t/ha (or 12 t/ha of fresh phytomass). Its main part was represented by roots. This is explained by the fact that moisture deficit in the topsoil layer prevented the proportional growth of the lawn grasses. Water-repellent agent (variant 2) favored the concentration of water in the toposoil. The plants received additional water-mineral supply, and the phytomass increased by 1.5 times (20 t/ha of fresh mass or 1.8 t/ha of dry mass) (Fig. 5). Parallel to this, roots became longer, but their portion in the total phytomass decreased (the aboveground phytomass constituted more than a half of the total phytomass).

The biological productivity and biometric parameters were somewhat higher for the lawns on the constructions with the peat layer (variant 4), crushed-stone screen (variant 5), and the peat layer in combination with the crushed-stone screen (variant 7). The amount of dry phytomass in these variants was 2.3–2.4 times higher as compared with the control and reached 2.6–2.8 t/ha. The amount of fresh phytomass was 2–2.3 times higher and reached 25–29 t/ha. Dry aboveground phytomass exceeded the root mass by 1.3–2 times in all the discussed variants of the soil constructions, which was expected for bunchgrasses at the initial development stages. Roots received sufficient moisture accumulated in the topsoil, and thus their length did not exceed 4–6 cm.

In the variant with two peat layers underlain by the crushed-stone screen (variant 8), the phytomass increased by 2.7 times (for dry phytomass) and by 3.4 times (for fresh phytomass) as compared with the control and reached 30 and 40 t/ha, respectively. The length of the roots was less than 5 cm, so that the lower peat layer did not contribute to the nutrition of the plants. It is probable, however, that the roots will penetrate deeper with time to reach the lower peat layer as an additional reserve of moisture and nutrients.

The greatest increase in the phytomass was obtained for the soil constructions with hydrogel, where the water reserves were also the highest. Hydrogel application to the loamy sandy soil (variant 3) caused the rise in the dry and fresh phytomass reserves by 3 and 3.5 times (up to 3.5 and 43 t/ha, respectively). When hydrogel was applied to the soil with the crushed-stone screen, the increase in the lawn productivity was even greater. The dry phytomass reached 5.2 t/ha (4.5 times higher than that in the control variant); 70% of it was composed of the aboveground grass mass. The mass and length of the roots on this plot were also the greatest (1.5 t/ha and 14 cm, respectively), despite their relatively small portion in the total biomass. This points to a larger volume of the soil occupied by the roots in comparison with that in other variants of the experiment.

An important advantage of such soil constructions is the possibility to manage the salt regime of the soils and to prevent the accumulation of hazardous soluble substances in the root zone. The experiments with soluble pollutants applied to the plots showed that these substances in the control soil were first leached off from the surface layer into the lower horizons, but then were redistributed by capillary flows so that up to 40–60% of their initial content was returned to the 20-cm-thick root zone. In the layered constructions without

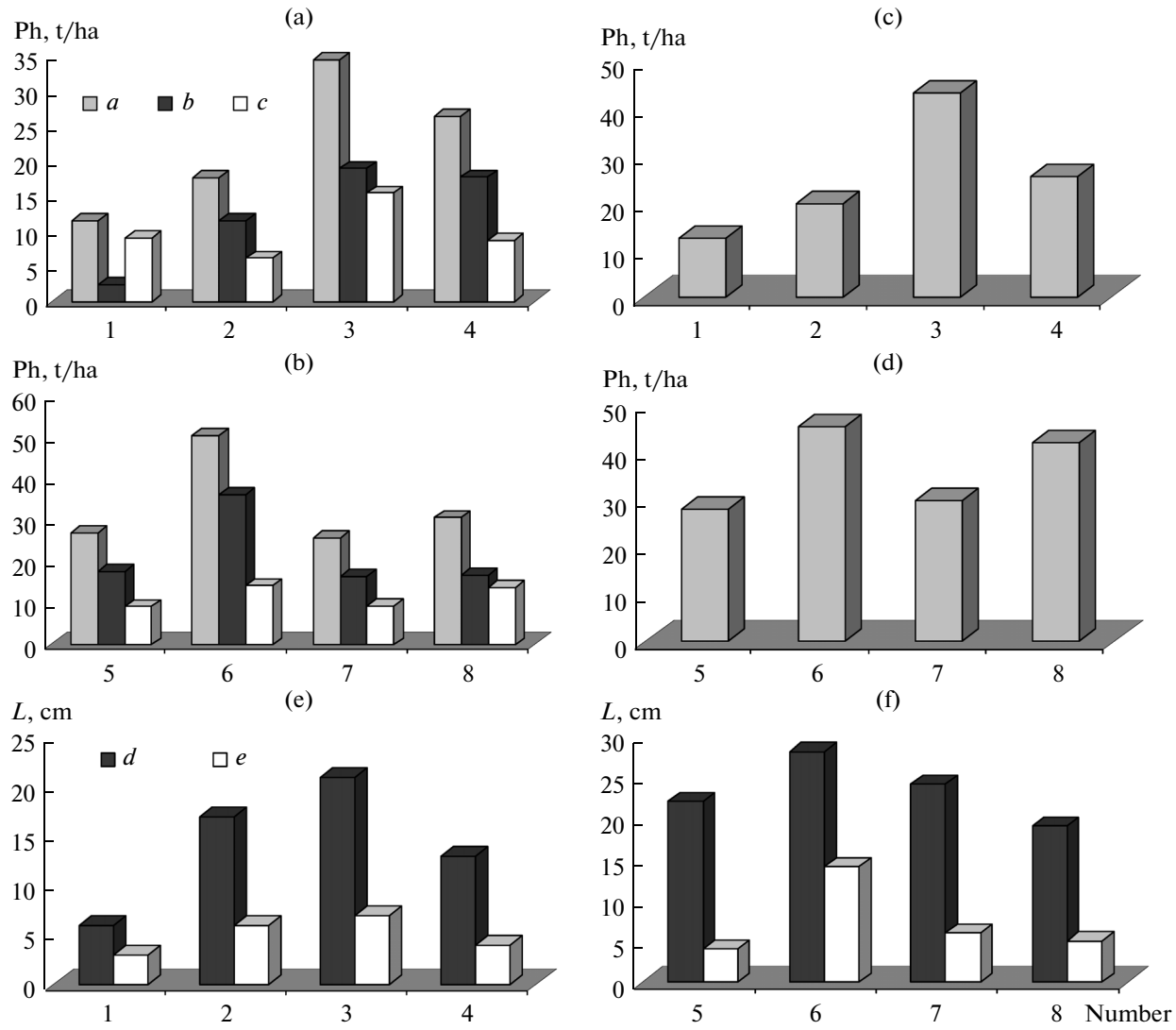


Fig. 5. Phytomass (a–d) and morphometric parameters(e, f) of lawn grasses in the experiment in Western administrative okrug of Moscow): (a, b) absolutely dry phytomass, (c, d) fresh phytomass (*a*—total phytomass, *b*—aboveground phytomass, and *c*—root phytomass), and (e, f) morphometric parameters of phytomass (*d*—length of grass, *e*—length of roots).

the crushed-stone screen (variants 2–4), the concentration of the contaminants in the topsoil did not exceed 30–40% of their initial content. In the variants with the crushed-stone screen, it did not exceed 20–30% of the initial level. More detailed information on this experiment, together with data on the biological activity of the soils (soil respiration) in the studied variants of soil constructions, are given in [16].

CONCLUSIONS

In general, our experiments showed the advantages of the layered soil constructions with the coarse-textured soil screen in comparison with the control soils and other experimental soils. These types of constructions can be recommended for growing vegetation plantations in cities with the high technogenic loads, resulting in the contamination (in particular, salinization) of the surface soil layers with soluble substances. The layered constructions with strongly swelling polymer hydrogels and crushed-stone subsoil screens showed the best results for Moscow. They can be recommended for soil construction in urban areas with the high anthropogenic loads [16].

In arid conditions, where water is the most valuable natural resource limiting agricultural development and the use of desert lands, the rates of irrigation water can be reduced by two times in the case of application of the layered soil constructions; in addition, such constructions protect the soils from secondary salinization. Russia is rich in the reserves of caustobioliths (peat and lignite) and natural gas, which is a potential raw material for the synthesis of swelling polymer hydrogels; it can become a global leader in the produc-

tion and export of natural, modified, and synthetic soil conditioners for sustainable land use in arid environments and for mitigation of the negative effects of land aridization phenomena.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Dean of the Faculty of Soil Science of Moscow State University and corresponding member of the Russian Academy of Sciences S.A. Shoba and Director of the Institute of Forest Science prof. A.A. Sirin fortheir continuous support of these studies and the organization of field experiments on soil construction in Moscow within the framework of State Contract PM no. 8/3-66n-10.

REFERENCES

1. *Agroforest Reclamation* (Sel'khozgiz, Moscow, 1956) [in Russian].
2. N. N. Bambalov, *Analysis of the Balance of Organic Matter in Peat Soils* (Nauka i Tekhnika, Minsk, 1984) [in Russian].
3. O. S. Bezuglova, *Fertilizers and Hormones* (Feniks, Rostov-on-Don, 2002) [in Russian].
4. V. I. Budnikov, V. N. Fedchenko, D. V. Drobinin, G. E. Kuz'mitskii, V. V. Sinkin, A. N. Lokotkov, A. V. Smagin, and V. B. Nazarov, RU Patent 2536509, 2014.
5. A. M. Bulgakov, *Building of Plain Sports Constructions* (Stroiizdat, Moscow, 1987) [in Russian].
6. A. D. Voronin, *Structural–Functional Hydrophysics of Soils* (Moscow State University, Moscow, 1984) [in Russian].
7. M. I. Gerasimova, M. N. Stroganova, N. V. Mozharova, and T. V. Prokof'eva, *Anthropogenic Soils* (Oikumena, Smolensk, 2003) [in Russian].
8. G. V. Dobrovolskii and E. D. Nikitin, *Soil Functions in the Biosphere and Ecosystems* (Nauka, Moscow, 1990) [in Russian].
9. F. R. Zaidel'man, *Genesis and Ecological Principles of Reclamation of Soils and Landscapes* (KDU, Moscow, 2009) [in Russian].
10. I. V. Zamotaev, Doctoral Dissertation in Geography (Moscow, 2009).
11. A. Kuhlman, *Artificial Structure-Forming Agents in Soil* (Kolos, Moscow, 1982) [in Russian].
12. E. V. Mironenko, O. A. Salimgareeva, A. A. Ponizovskii, and S. M. Chudinova, "The effect of hydrophobic liquids on the soil water retention and water energy status," Eurasian Soil Sci. **33** (4), 404–410 (2000).
13. "Rules for Creation, Maintenance, and Protection of Green Plantations in Moscow," Adopted by Moscow Government on September 10, 2002 (No. 743-PP); revised by Moscow Government on May 11, 2010 (No. 386-PP) [in Russian].
14. A. V. Smagin, "Column-centrifugation method for determining water retention curves of soils and disperse sediments," Eurasian Soil Sci. **45** (4), 416–422 (2012).
15. A. V. Smagin, "Theory and methods of evaluating the physical status of soils," Eurasian Soil Sci. **36** (3), 301–312 (2003).
16. A. V. Smagin, *Theory and Practice of Soil Construction* (Moscow State University, Moscow, 2012) [in Russian].
17. A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, T. V. Nazarova, A. B. Kiryushova, A. V. Mashika, and A. M. Eremina, "The effect of organic matter on the water-retention capacity of soils," Eurasian Soil Sci. **37** (3), 267–275 (2004).
18. A. V. Smagin, G. M. Khakimova, D. A. Khineeva, and N. B. Sadovnikova, "Gravity factor of the formation of the field and capillary water capacities in soils and artificial layered soil-like bodies," Eurasian Soil Sci. **41** (11), 1189–1197 (2008).
19. V. I. Smetanin, *Rehabilitation and Management of Disturbed Lands* (Kolos, Moscow, 2000) [in Russian].
20. A. B. Umarova, A. E. Vaigel', A. A. Kokoreva, M. M. Suslenkova, and M. A. Butylkina, "Functions of specific soil construction in Moscow," Vestn. Orenb. Gos. Univ., No. 10(159), 355–358 (2013).
21. I. S. Urusevskaya and N. N. Matinyan, "Anthropogenically transformed soils of insular monasteries in the taiga-forest zone of Russia," Eurasian Soil Sci. **38** (9), 944–953 (2005).
22. E. V. Shein, *Lectures on Soil Physics* (Moscow State University, Moscow, 2005) [in Russian].
23. W. A. Adams and R. L. Jones, "The effect of particle-size composition and root binding on the resistance to shear of sports turf surface," Rasen, Turf, Gazon, No. 2, 48–68 (1979).
24. S.W. Baker, "Criteria in topsoil selection for sports turf," Agric. Eng. **45** (3), 87–88 (1990).
25. P. W. van Deventer, "Contradicting approaches to the establishment and construction of sports," in *First International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic, and Mining Areas "Application of Soil Information,"* (University of Essen, Germany, 2000), vol. 2, pp. 541–542.
26. R. Lehr, *Taschenbuch fuer den Garten- Landschafts- und Sportplatzbaus* (Parey Buchverlag, Berlin, 1997).
27. PRESTO Products Company, *Technical Literature on the Geoweb Cellular Confinement System,* 1985–1995. http://www. presto.ru/
28. J. Šimůnek, M. Šejna, and M. Th. van Genuchten, *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably–Saturated Media, Version 1.0* (International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 1998).
29. J. Šimůnek, M. Th. van Genuchten, and M. Šejna, *The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical Manual, Version 1.0* (PC Progress, Prague, Czech Republic, 2006).
30. A. V. Smagin, S.A. Shoba, R.R. Kinjaev, A.R. Dolzhich, and V. M. Sukhanov, *AridGrow – Ideal Soil System* (Moscow State University, Moscow, 2005).

Translated by I. Bel'chenko

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова
Институт экологического почвоведения
Факультет почвоведения

А.В. Смагин

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЧВ

Издательство
Московского университета
2012

УДК 631 4
ББК 40.3
С50

Печатается по решению Ученого совета ИЭП МГУ

Рецензенты:
проф. И. И. Судницын (МГУ имени М.В.Ломоносова),
проф. И. С. Белюченко (Кубанский госагроуниверситет)

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований

Смагин А. В.

С50 Теория и практика конструирования почв.- М.: Издательство Московского университета, 2012. - 544 с., ил.

ISBN 978-5-211-06299-3

Монография посвящена научно-методическим и экспериментальным основам почвенного конструирования - инновационного направления в геоэкологии, почвоведении и ландшафтной инженерии, позволяющего с помощью моделей физической организации почв проектировать и создавать оптимальные по своим характеристикам почвенные объекты (конструктоземы) с использованием натуральных и синтетических материалов - почвенных кондиционеров. В теоретической части работы анализируются эдафические факторы, процессы и модели природной структурно-функциональной организации почв, составляющие фундаментальную базу технологического моделирования для выявления оптимальных параметров почвенных конструкций на стадии проектирования. На практике предложенные варианты почвенных конструкций продемонстрировали высокую эффективность в условиях поливного земледелия и ландскейпинга в аридном климате стран Персидского залива (ОАЭ, Бахрейн, Катар, Иордания), а также озеленения и благоустройства городских территорий с высокой антропогенной нагрузкой на примере столичного мегаполиса.

Для специалистов в области почвоведения, инженерной экологии, ландшафтной архитектуры, организаций, работающих в сфере земледелия, рекультивации, озеленения и комплексного благоустройства земель, студентов, аспирантов вузов по специальностям «Экология» и «Почвоведение».

УДК 631.4
ББК 40.3

Smagin A.V.

Theory and Practice of soil engineering. - M.: Moscow State University Press, 2012. - 544 p.

© Смагин А.В., 2012
ISBN 978-5-211-06299-3 © Издательство Московского университета, 2012

СОДЕРЖАНИЕ:

От автора……...6

ГЛАВА 1. Аналитический обзор проблемы почвенного конструирования.…….12
1.1.Почвенно-экологические условия жизни растений и их специфика в антропогенных ландшафтах. ……..…12
1.2.Структурно-функциональная организация почв и ее учет в проблеме почвенного конструирования. …….31
1.3.Природные и синтетические материалы для улучшения качества и конструирования почв.……..…....62
1.4.Виды и технологические схемы почвенных конструкций различного функционального назначения. ……...101

ГЛАВА 2. Научно-методические и экспериментальные основы проектирования конструктоземов.……..…..151
2.1.Структурно-энергетическая концепция физического состояния почв и доступности влаги растениям.. ……..…...151
2.2.Характеристика современных почвенно-гидрофизических моделей и их возможностей для целей конструирования почв (на примере HYDRUS-1D)... ……...174
2.3.Экспериментальное обеспечение моделей и современные методы его получения... …….....185

ГЛАВА 3. Методы мониторинга почвенных режимов и экологического контроля при тестировании технологий почвенного конструирования……..210
3.1.Методика автоматизированного мониторинга температурного режима и динамики относительной влажности с помощью программируемых датчиков……210
3.2.Методика мониторинга водно-воздушного режима почв и конструктоземов с использованием диэлькометрии и весового контроля... ……..218
3.3.Метод съемных монолитов-реперов для оценки динамики запасов влаги, водорастворимых загрязняющих веществ и закономерностей их профильного распределения.... …….. 225

3.4.Методика контроля почвенного дыхания и газовой функции почвенных объектов с использованием портативных газоанализаторов..... ……230
3.5.Методика оценки биометрических показателей и запаса фитомассы травянистой растительности..... ……....238

ГЛАВА 4. Лабораторные исследования почвогрунтов, почвенных материалов и их комбинаций для обеспечения технологий конструирования……..240
4.1.Влияние синтетических и природных полимерных материалов на водоудерживающую способность и структурное состояние почвенных субстратов. ……240
4.2.Влияние синтетических и природных почвомодификаторов на влагопроводящие свойства почв и грунтов.. ……284
4.3.Граничные условия: исследование эвапотранспирации в почвогрунтах и слоистых конструкциях... ……307
4.4.Деструкция биополимеров в почвенных конструкциях и ее моделирование. ……316

ГЛАВА 5. Технологическое моделирование и экспериментальные исследования для разработки параметров слоистых почвенных конструкций..……330
5.1.Поливариантные расчеты почвенных режимов с помощью модели «HYDRUS-1D» при проектировании влагоаккумулятивных почвенных конструкций с защитными экранами.. ……330
5.2.Упрощенный метод номограмм для определения гидрофизических параметров слоистых почвенных конструкций.. ……348
5.3.Оценка глубины заложения органогенных слоев почвенных конструкций по моделям их потенциальной биодеструкции.. ……...352
5.4.Экспериментальные исследования и моделирование слоистых почвенных конструкций на макетах малого размера... ……361

ГЛАВА 6. Почвенно-экологическая характеристика условий на объектах тестирования почвенных конструкций..……384

6.1. Характеристика зарубежных объектов исследования…...384
6.2. Характеристика подмосковных объектов исследования (предварительные эксперименты)……..…...390
6.3. Характеристика объектов исследования г. Москвы…….395

ГЛАВА 7. Описание вариантов исследуемых почвенных конструкций и почвомодификаторов для озеленения и благоустройства территорий с повышенной антропогенной нагрузкой...……..……411
7.1. Опыт конструирования в аридных климатических условиях…….……...……411
7.2. Почвенные конструкции на объектах г. Москвы и ближнего Подмосковья …….……..421

ГЛАВА 8. Результаты полевых экспериментов по тестированию слоистых почвенных конструкций для озеленения и благоустройства территорий с повышенной антропогенной нагрузкой……..433
8.1.Предварительные зарубежные эксперименты в условиях орошения и вторичного засоления аридных земель……..433
8.2.Предварительные эксперименты в УОПЭЦ МГУ «Чашниково»……448
8.3.Основной эксперимент на стационарном объекте в ЗАО г. Москвы……..455
8.4.Дополнительные эксперименты на различных тестовых площадках г. Москвы……..478

ГЛАВА 9. Проект регламента инновационных технологий почвенного конструирования для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой (для условий г. Москвы)……..…….487

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……..……....522

ЛИТЕРАТУРА...……..……....525

ПРИЛОЖЕНИЕ (ЦВЕТНЫЕ ИЛЛЮСТРАЦИИ)..……...543

От автора

Конструирование почв – инновационное направление в инженерной экологии, почвоведении и земледелии, целью которого является научно-обоснованное проектирование и создание при помощи технических средств, природных и синтетических материалов в почвенно-грунтовой толще системы рабочих слоев (горизонтов), коммуникаций, барьеров и иных структурных элементов с целью оптимизации почвенных свойств, режимов и экологических функций в антропогенных ландшафтах. Истоки этого направления прослеживаются в пойменном земледелии древних цивилизаций (Нил, Междуречье и т.д.), применявших силу водных потоков и материал речных наносов для формирования плодородных горизонтов с высокой влагоемкостью и запасом питательных веществ. В ряде стран для создания плодородных почв использовался длительный кропотливый ручной труд (насыпные почвы «хейлуту» Лессового плато в Китае, североевропейские рукотворные почвы «плагген» и др.). Эти трудоемкие технологии наряду с традиционными способами поддержания и восстановления плодородия почв посредством регулярного внесения навоза и компостов, периодического отведения земель под залежь, были основаны на опыте многочисленных поколений земледельцев, и по существу, приближались к естественным процессам воспроизводства почвенных ресурсов в природных экосистемах, где на непрерывное почвообразование тратится до 50% ежегодно синтезируемой органической продукции и заключенной в ней энергии. О таких затратах уместно напомнить сегодня в связи с усиливающейся антропогенной деградацией почвенных ресурсов, равно как и обратить внимание на то, что слово «земледелие» можно трактовать не только как труд на земле, но и как «деланье» самой земли (почвы), без чего не обойтись ни в сельском ни в городском хозяйствах. Со временем технологии воспроизводства земель и оптимизации свойств почв стали обогащаться научными, инженерными знаниями, а также использовать вместо ручного – механизированный труд и разнообразные материалы, включая синтетические. Так возникли проектируемые дренажные

сооружения и иные почвенно-мелиоративные конструкции, основанные на достаточно строгом инженерном расчете.

Современный этап становления и развития почвенного конструирования как самостоятельного фундаментального направления связан в первую очередь с успехами в области математического моделирования процессов, обусловливающих функционирование почв как сложных динамических биокосных систем в потоках веществ, энергии и информации [Смагин и др., 2008]. Подобные модели позволили перейти на качественно новый уровень проектирования почвенных конструкций с определением их функциональных параметров в численных компьютерных экспериментах, имитирующих процессы движения тепла, влаги и растворенных веществ, их корневого потребления, распределения поллютантов, биодеструкции органических компонентов и ряда иных явлений, определяющих функционирование и устойчивость почвенных конструкций в тех или иных климатических условиях, режимах эксплуатации и антропогенных нагрузок.

В нашей стране первые численные модели энергомассопереноса в почвах как распределенных гетерофазных пористых средах с набором различных структурно-функциональных слоев (горизонтов) были созданы в 90-х годах благодаря работам Е.В. Мироненко, Я.А. Пачепского и их коллег из Института почвоведения и фотосинтеза АНСССР (г. Пущино на Оке). Тем самым постепенно уменьшалось значительное отставание в этой области от передовой зарубежной науки (США, Европа), где подобные компьютерные модели уже существовали достаточно длительное время и были востребованы инженерной практикой. Новые разработки ИПФС были незамедлительно внедрены в учебный процесс на факультете почвоведения МГУ по инициативе Е.В. Шеина, ставшего позже заведующим кафедрой физики и мелиорации почв. Его дружественные связи с лидирующей американской школой по моделированию почвенно-физических процессов, хорошие организаторские способности позволили постепенно сформировать на кафедре банк современных программных продуктов, подобрать и подготовить коллектив молодых специалистов, для активного использования методов компьютерного моделирования, как в

научном творчестве, так и в образовательном процессе. Базовый принцип применения физически обоснованных моделей транспорта влаги, тепла и растворенных веществ для проектирования почвенных конструкций был сформулирован в новом университетском учебнике по физике почв [Шеин, 2005].

Параллельно коллектив кафедры разрабатывал и осваивал современные инструментальные методы оценки почвенно-физических свойств, характеристик и режимов, необходимые для получения информационного обеспечения подобных моделей [Теории и методы, 2007]. Тем самым на качественно новом уровне развивалось и дополнялось фундаментальное термодинамическое направление в гидрофизике, заложенное в работах старшего состава кафедры [Судницын, 79, Воронин, 84, Березин, 87]. В результате к моменту появления первого практического интереса к теме почвенного конструирования, кафедра располагала всем необходимым для научного обеспечения проектов в данной области. Такой интерес возник спонтанно в среде российских бизнесменов, пытавшихся выйти на перспективный рынок в сфере озеленения развитых арабских стран Персидского залива. Результатом их коммерческого предложения стал первый проект кафедры по почвенному конструированию с использованием природных (торф) и синтетических (гидрогель) российских материалов, реализованный летом 1995 г на опытной станции Муниципалитета Дубаи (О.А.Э). Автор принял самое деятельное участие в этом проекте, обосновав в лабораторных экспериментах слоистый способ внесения органических кондиционеров вместо их перемешивания с минеральной массой, и предложив основные «рабочие» варианты почвенных конструкций для выращивания зеленых газонов в аридных почвенно-климатических условиях. Полевые эксперименты, проведенные совместно с научным сотрудником А.К. Губером на опытной станции Муниципалитета Дубаи под независимым контролем арабских специалистов, выявили значительное преимущество предложенных российских технологий в виде 1,3-2 кратной экономии поливной влаги и аналогичного прироста фитомассы газонов на почвенных конструкциях по сравнению с контролем и традиционными вариантами озеленения в эмирате Дубаи [Смагин и др., 99].

Полученный практический опыт был востребован позже (2005-2008 гг), когда автору предложили возглавить научное сопровождение ряда аналогичных проектов в других странах Аравийского полуострова (Катар, Бахрейн, Кувейт, Иордания) в связи с реализацией российских торфосапропелевых почвомодификаторов «AridGrow» для озеленения и поливного земледелия в аридных условиях. В этих проектах наряду с решением задач аккумуляции влаги и питательных веществ в корнеобитаемой зоне был впервые обоснован и опробован на практике способ борьбы с вторичным засолением посредством отсечения расчетной толщи почвы от нижележащих горизонтов грубодисперсным экраном [Смагин, 2006, Smagin et.al., 2005]. Внедрение грубодисперсной прослойки на расчетную глубину способствовало разрыву капиллярной связи и прекращению обратных токов влаги с легкорастворимыми солями к поверхности, а также вопреки распространенному мнению способствовало не дренажу, а аккумуляции влаги в верхней корнеобитаемой зоне. В качестве альтернативного метода с аналогичной целью оказалось возможным использовать кремнийорганические гидрофобизаторы. При расчете параметров соответствующих почвенных конструкций применялась современная компьютерная среда HYDRUS (США) для моделирования энергомассопереноса в распределенных почвенно-физических системах с набором функциональных горизонтов [Смагин, Садовникова, 2009]. Поскольку основные материалы для почвенного конструирования представляли собою органические вещества, была поставлена и успешно решена задача оценки темпов биодеструкции и устойчивости почвомодификаторов с использованием оригинальных кинетических моделей их поведения в почвах. При этом оказалось выгодным вносить часть материалов не в поверхностный слой, а на определенную глубину, что резко повышало их устойчивость к биодеструкции и пролонгировало положительное воздействие как компонента почвенной конструкции.

Более 10 лет данные разработки в области почвенного конструирования с использованием природных и синтетических российских материалов были предметом практической реализации лишь в зарубежных странах. Однако в 2009 г. ими

заинтересовались в Правительстве Москвы, результатом чего явился конкурсный проект НИОКР «Разработка технологии почвенного конструирования для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой». Конкурс был выигран АНО «Экотерра» (МГУ им. М.В. Ломоносова), и в 2010 году автор по поручению этой организации возглавил научное руководство проектом в рамках Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10. Успешно проведенные в экстремально засушливый сезон 2010 г эксперименты с предложенными на основе предварительного технологического моделирования разнообразными вариантами почвенных конструкций подтвердили их высокую эффективность в условиях столичного мегаполиса. Окончательным результатом проекта явилась разработка соответствующего технологического регламента, переданного в 2011 г. потенциальному пользователю в лице департамента ЖКХ г. Москвы.

Поскольку лишь часть из обозначенных выше результатов публиковалась ранее в разрозненном виде, в настоящей монографии, по-видимому, впервые в отечественном почвоведении и инженерной экологии предпринята попытка обобщения темы конструирования почв с использованием всего предшествующего опыта, как в теории, так и на практике. Автор надеется, что работа вызовет интерес в различных кругах от исследователей в области фундаментальной науки о почвах до многочисленных представителей современного бизнеса, связанного с поливным земледелием, озеленением и комплексным благоустройством антропогенных ландшафтов. Пионерный характер работы позволяет ожидать разнообразную реакцию на ее появление, дискуссионные вопросы, советы и замечания, которые можно направлять по электронному адресу **smagin@list.ru.** Буду рад ответить на них в меру своих сил и возможностей, а также появлению заинтересованных во внедрении этого перспективного направления единомышленников.

Значительная часть представленного в монографии экспериментального материала была получена сотрудниками, аспирантами и студентами ф-та почвоведения и института Экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, работавшими под руководством автора или вместе с ним в

разные годы по данной теме. Некоторые данные были любезно предоставлены зарубежными специалистами и организациями. Всем автор приносит искреннюю благодарность с осознанием неоценимости этой помощи. Особенно хочется отметить труд близких и коллег – к.б.н. н.с. Н.Б. Садовниковой, к.б.н. н.с. Р.Р. Кинжаева, к.б.н. н.с. А.В.Арзамазовой, к.б.н., доц. Л.Г. Богатырева, д.б.н., проф. О.А. Макарова, к.б.н. н.с. А.К. Губера, н.с. И.И. Гудимы, н.с. Мунира Гайза (эмират Дубаи), н.с. Ахмеда Сафи (королевство Бахрейн), аспирантов Н.А. Азовцевой, И.Л. Пепелова, И.С. Поляковой (Росете), студентов А.А. Шитухиной, А.В. Рачек, А.С. Башиной, У.Д. Конгаржап. Зарубежные исследования были бы невозможны без финансово-организационной поддержки российско-арабских кампаний ДИМКО ЛЛС, NOP, NOP-NASS, МНЦП ЮНЕПКОМА и их руководителей, среди которых особенно хочется выделить г-на А.Р. Должича, дружественное расположение, личный опыт, труд и энтузиазм которого неоднократно позволяли справляться с самыми сложными рабочими и житейскими ситуациями. Московский этап работы по теме в рамках Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10. был реализован целиком и полностью благодаря инициативе и неизменной помощи декана ф-та почвоведения МГУ, чл-корр. РАН С.А. Шобы. Отдельную признательность хочется выразить моим учителям, наставникам и коллегам старшего поколения: академику РАН Г.В. Добровольскому, академику РАЕН, проф. И.И. Судницыну и проф. И.С. Белюченко за доброжелательность, помощь, дружественные советы не только в адрес данного труда, но и в отношении самого автора на протяжении всей его творческой жизни.

Октябрь 2011, г. Москва, Крылатское.

Проф. А.В.Смагин.

Моей жене Надежде,
чья любовь, вера и мудрость
сделали возможным этот труд.

ГЛАВА 1. Аналитический обзор проблемы почвенного конструирования.

1.1. Почвенно-экологические условия жизни растений и их специфика в антропогенных ландшафтах.

С позиций современной экологии ***почва*** представляет собою верхний, плодородный слой Земли, в котором усилиями многочисленных поколений организмов создается, упорядочивается и непрерывно поддерживается необходимый для их жизни и воспроизводства запас веществ, энергии и информации. Значение почвы в жизни природных и антропогенных ландшафтов отражают ее ***основные экологические функции*:**

- ***плодородие*** – способность инициировать и поддерживать рост, развитие и размножение дикорастущих и культурных видов растений и микрофлоры, обеспечивая их естественные потребности в пространстве, влаге, питательных веществах, тепле и других экологических факторах;
- ***деструкция*** (разложение) органических веществ и их соединений. В почвах, благодаря жизнедеятельности микроорганизмов и почвенных животных происходит обратный фотосинтезу процесс распада, без которого не мог бы существовать биологический круговорот веществ и энергии, исчез непрерывный источник материала для нового синтеза, а экосистемы погибли бы в собственных отходах;
- ***газовая функция*** – почвы служат важнейшим источником, стоком и резервуаром газообразных веществ по отношению к атмосфере, обеспечивая регуляцию ее состава, состояния и качества. Не только растения, но и сами почвы контролируют состав атмосферы и наличие в ней вредных газов. Так, 70-80% окиси углерода (CO), 80-85% диоксида серы, и других токсикантов поглощаются из атмосферы и утилизируются почвенным покровом. И наоборот, при нарушении функционирования почв, активизации процессов

биодеструкции органических веществ, почвенный покров выделяет на порядок больше CO_2 и поглощает кислорода, чем весь автотранспорт, промышленные предприятия и население;

• ***очищение окружающей среды и ремедиация*** – почвы являются своеобразными лабораториями, в которых воспроизводятся основные элементы окружающей среды – земля, вода, воздух. Почвы закрепляет земную поверхность, предохраняя ее от размывания и ветровой эрозии, образования пыли. В почвах происходит очищение поверхностных вод и атмосферных осадков, поглощение, иммобилизация, детоксикация и распад твердых, жидких и газообразных веществ, загрязняющих окружающую среду и опасных для здоровья и жизни населения;

• ***консервация и депонирование*** жизненно-необходимых для будущих поколений веществ, энергии и информации. Для живых организмов почва выполняет роль аккумулятора, банка, где до востребования хранятся необходимые для роста и развития биофильные элементы, влага, макроэргические органические и органоминеральные соединения, ферменты, регуляторы роста, а также генетическая информация в виде зачатков новой жизни (семян, спор, клубней, луковиц…, яиц и личинок насекомых, червей и прочих животных…);

• ***поддержание биоразнообразия,*** естественный отбор видов и регуляция взаимоотношений организмов. В почвах как ни в каких иных средах концентрируются различные виды организмов и проявляются их сложные взаимоотношения, от которых в свою очередь зависят устойчивость и эволюционное развитие жизни на планете. Регуляция этих взаимоотношений осуществляется через пищевые (трофические) цепи, а также посредством биоактивных веществ – ферментов, ингибиторов и стимуляторов роста, аттрактантов и репеллентов, находящихся в почвах. Нарушение биоразнообразия, подавление регуляторной функции почв в процессе их эксплуатации может приводить к необратимым изменениям и гибели ландшафта в целом, появлению патогенных форм микроорганизмов и экзотоксинов.

Все перечисленные выше и иные известные экологические функции почвы [Добровольский, Никитин, 90] подчеркивают ее активное начало. Почва, не пассивный продукт действия неких внешних сил (экзон), не мертвый грунт

(порода), а устойчивая, самоорганизующаяся, активная биокосная система, благодаря своей «четвертой фазе» – живому веществу и тем вещественно-энергетическим запасам, которые накопились в ней в процессе средообразующей аккумулирующей деятельности многочисленных предшествующих поколений. Она создается, поддерживается живыми организмами и для живых организмов, поскольку является одним из наиболее значимых условий жизни.

В связи с проблемой конструирования почв для устойчивого земледелия и городского озеленения, рассмотрим какие же основные факторы роста и развития зеленых насаждений связаны с почвенной средой. Это в первую очередь ***потребность в пространстве*** и возможность размещения корневых систем, семян, клубней и иных частей растений. За доступное почвенное пространство, его освоение среди растительности идет сильная конкуренция, которая во многом определяет нежелательные процессы деградации искусственно-создаваемых типов зеленых насаждений с неустойчивыми по отношению к сорным эксплерентным видам наборами сортов культурных растений. Недостаток почвенного пространства в городах, возникающий при запечатывании поверхности дорожными покрытиями, размещении надземных и подземных элементов различных строений и коммуникаций часто является причиной угнетения роста и гибели древесно-кустарниковой растительности с большой подземной фитомассой и потребностями в объеме почвы для корневых систем. Поэтому при проектировании и создании зеленых насаждений чрезвычайно важным является сохранение в достаточном для них количестве почвенного ресурса, как по площади, так и по объему (глубине). Не случайно в новом законе г. Москвы «О городских почвах» 04.07.2007 № 31 впервые введен четкий, хотя и условный критерий почвенной толщи мощностью в 1 метр.

С доступным для корневых систем почвенным пространством напрямую связан основной эдафический фактор – ***водного питания*** растений. К сожалению, на практике о нем часто забывают и ищут причины плохой приживаемости и гибели растений лишь в качестве почвенного ресурса – наличия в избытке элементов минерального питания, отсутствия

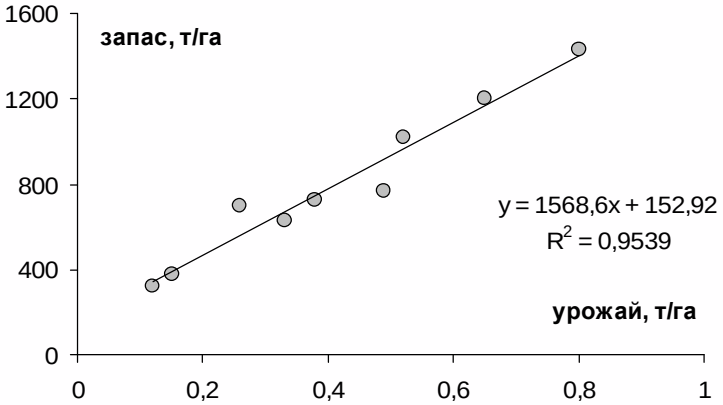


Рис.1.1. Связь между продуктивностью (урожаем) эфемерово-полынных пастбищ и весенними запасами доступной влаги в почве по [Быков, 83].

загрязняющих веществ. На самом деле эти причины, равно как и различные виды заболеваний культурной растительности чаще всего являются побочными или вторичными по отношению к главной проблеме – недостатку влаги. Продуктивность (фотосинтез) растений в условиях достаточной освещенности и типичного в последние годы избытка атмосферного CO_2 напрямую определяется водопотреблением – потоком воды и растворенных веществ из почвы в корневые системы или так называемой ***транспирацией влаги*** растительностью [Шевелуха, 92]. На одну единицу фотосинтетической продукции растения вынуждены тратить от 200-400 (деревья, кустарники) до 700-1000 (травы) и более единиц транспирационной влаги [Быков, 83]. По правилу Вальтера [Мигунова, 93] в районах с количеством осадков менее 600 мм одна тонна фотосинтетической продукции создается на каждые 100 мм осадков или 1000 т/га воды.

Эти положения иллюстрируются рисунком 1.1, на котором показана тесная корреляционная связь (R^2=0,95) между запасами доступной влаги в почвах и урожаем пастбищного травостоя. Угловой коэффициент полученной линейной зависимости или так называемый коэффициент транспирации равен 1568, то есть для получения 0,2-0,8 т/га пастбищных

кормов требуется минимум 300-1500 т/га (30-150 л/м^2) почвенной влаги в виде весенних влагозапасов.

Для относительно нетребовательных к влаги древесных культур в виде сосновых насаждений, как показывают наши расчеты с использованием оригинальных триггерных моделей роста в зависимости от эдафических факторов [Смагин, 2007], критическим уровнем увлажнения является количество осадков 300мм. Полученный вывод моделирования хорошо соотносится с данными лесохозяйственного районирования, согласно которым ареал распространения сосны обыкновенной ограничен на юге изолинией осадков 300 мм [Молчанов, 60]. Сходную информацию приводит Е.С. Мигунова в монографии «Леса и лесные земли» [1993]: «Леса обычно не заходят в районы, где выпадает менее 400 мм осадков… При количестве доступной влаги менее 300 мм естественные леса отсутствуют, а искусственные посадки неустойчивы и недолговечны».

Значительными величинами водопотребления в виде транспирационных коэффициентов 900-1300 единиц характеризуются культурные злаковые и бобовые растения, выращиваемые в условиях поливного земледелия [Shoba, Smagin, 2006]. При продуктивности порядка 6-10 т/га их потребности во влаге за сезон превышает 8000 т/га (800 мм) (рис. 1.2). И здесь возникает серьезная проблема, связанная с водоудерживающей способностью почв. Основная часть поливной влаги теряется на фильтрацию, причем в аридных почвах более легкого гранулометрического состава с малым (0,5-1,3%) содержанием гумуса и соответственно, низкой водоудерживающей способностью, эти потери в 2-6 раз выше, чем на российских и украинских черноземах с высокой концентрацией органических веществ (до 8-10%) и суммарной энергией водоудерживания до 150-200 Дж/кг. Эта проблема должна быть поставлена в центр внимания почвенного конструирования, основной целью которого по аналогии со средообразующей деятельностью живых организмов в природе следует признать сосредоточение в верхней корнеобитаемой толще необходимых для роста и развития растений запасов влаги и питательных элементов в доступной форме при минимальных непродуктивных потерях. В природе это происходит благодаря поступлению из растительного блока,

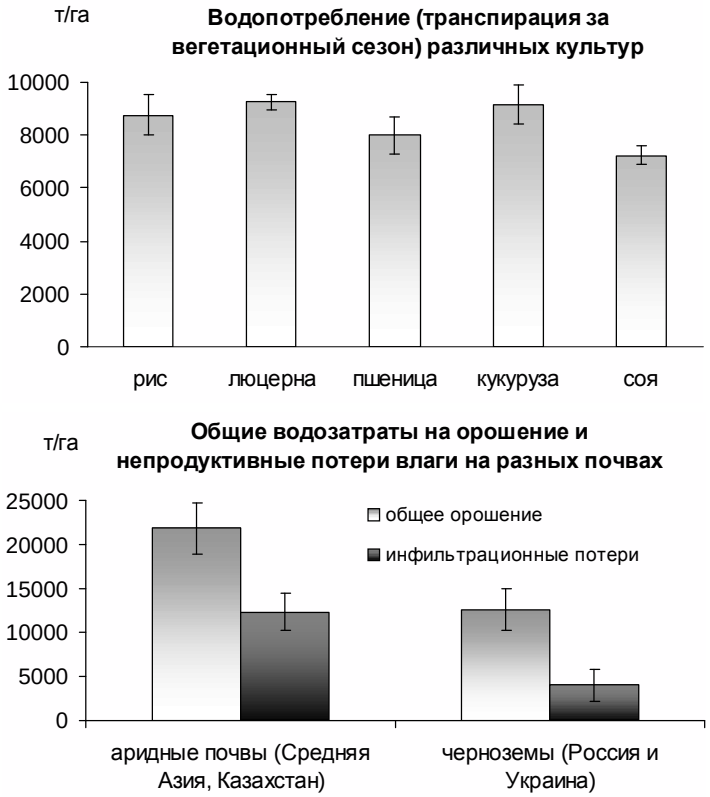


Рис.1.2. Анализ водопотребления травянистых культур и распределения водозатрат в орошаемом земледелии по [Shoba, Smagin, 2006].

гумификации и аккумуляции в верхних слоях почвогрунтов органических веществ – биополимеров, обладающих высокой поверхностной энергией, способностью удерживать питательные вещества и влагу, формировать органоминеральные агрегаты почвенной структуры, в которых в оптимальном для растений количестве сосредотачиваются вода, воздух и необходимые элементы питания. В агро- и урболандшафтах можно целенаправленно создавать аналогичные органогенные слои (горизонты) с использованием биополимеров-почвомодификаторов природного и синтетического генезиса.

Ведущее значение почвенного водоснабжения растительных культур в их развитии и продуктивности выявляется и при анализе действия этого фактора в мегаполисах. Например, плохая приживаемость древесных культур, особенно хвойных, связана в первую очередь с недостатком почвенной влаги в засушливые годы. Листовая поверхность и, соответственно, транспирирующая способность у большинства хвойных деревьев и кустарников выше, чем у лиственных, и в природе подобные растения (ель, пихта) чаще всего населяют сырые местообитания с избытком атмосферных осадков и почвенно-грунтовой влаги. В городе для их интродукции необходимо выбирать соответствующие участки мезорельефа, правильно рассчитывать индивидуальную площадь питания и водоснабжения и организовывать периодические поливы, особенно на стадиях посадки и приживаемости.

Не меньшие, а иногда и большие потребности в почвенной влаги у газонной растительности в виде смеси злаков, осок и злаково-бобовых культур. В отличие от древесной растительности корневые системы трав, как правило, локализуются в верхних 20-30 см слоях почвогрунтов и лишь со временем осваивают более глубокие горизонты, где может сохраняться влага в засушливые сезоны. Именно недостаток влаги, а не пресловутое загрязнение почв, приводит к гибели городских цветников и газонов в периоды летней засухи. Мониторинг водного режима корнеобитаемого слоя газонов в Московском зоопарке показывает, что в течение вегетационного сезона травянистая растительность неоднократно испытывает дефицит влаги (рис. 1.3). В качестве критерия водного, а точнее – водно-воздушного режима используется безразмерный показатель относительной влажности почвогрунта или степени насыщенности его порового пространства влагой W/Ws [Смагин и др., 2006, 2008]. Здесь W – текущая влажность почвы, W_s – ее максимально возможное значение в состоянии полного насыщения или заполнения всех пор и пустот влагой. Очевидно, при приближении показателя W/W_s к 1 будет диагностироваться недостаток воздуха и загнивание корневых систем, а при стремлении к нулю или точнее к влажности устойчивого завядания, которая для исследуемых легкосуглинистых

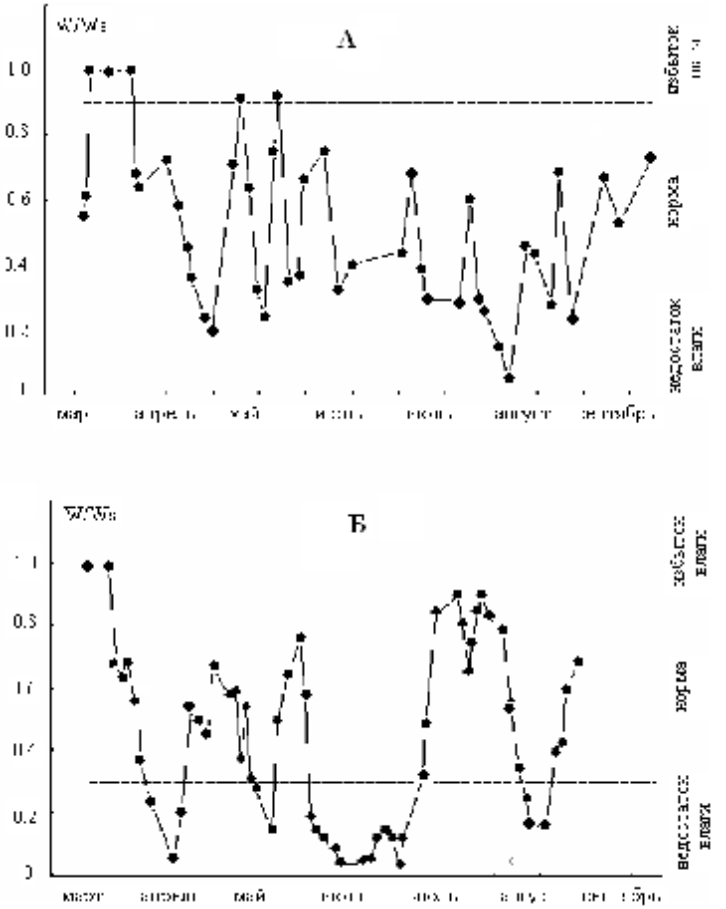


Рис.1.3. Мониторинг водно-воздушного режима почв Московского зоопарка под газонной растительностью по [Смагин и др. 2008]. А- 2006 г., Б- 2007 г.

почвогрунтов грунтов составляет порядка 30% от полной влагоемкости (W/W_s=0,3), будет проявляться дефицит влаги.

Дефицит влаги, особенно в периодически повторяющиеся засушливые годы (2002, 2005, 2007 гг), продолжается до 20-30 суток, что губительно сказывается на состоянии газонов. Без дополнительных поливов в такие сезоны городские газоны

обречены на «выгорание», то есть необратимое завядание и отмирание вегетативной массы. Это положение иллюстрирует фото 1 (см. **Приложение цветных иллюстраций** в конце книги) на котором приводятся сделанные в 2010г фотографии различных вариантов московских территорий вдоль ул. Минская в р-не Поклонной горы. Участок около мечети содержится в идеальном порядке и по нему проложена система полива растительности с капельным орошением почвопокровников и кустарников и дождеванием газонов. В результате газоны при регулярном поливе во время летней засухи сохраняли зеленую вегетативную массу и выглядели должным образом (верхние фотографии). Муниципальные территории по обочине дороги несмотря на видимую деятельность по их благоустройству (высадка цветов, уборка мусора, кошение) были доведены до крайней степени деградации лишь потому, что на них за все время засухи не было произведено ни одного полива. В результате необратимого завядания газонов почва под ними обнажилась и превратилась в источник постоянной пыли вдоль автомагистрали.

Понимание истинных причин негативного состояния городской растительности важно для их учета при проектировании почвенных конструкций под озеленение, а также для правильной организации мер по уходу за зелеными насаждениями мегаполиса. Так в недавно принятых правилах содержания зеленых насаждений от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 27.02.2007 № 121-ПП) регламентируется процедура регулярного скашивания через 10-15 дней, независимо от состояния увлажнения почвы. И хотя в этих же правилах содержатся указания об обязательных поливах цветников, газонов и иных форм городской растительности, к сожалению, на практике эти указания чаще всего игнорируются, а на газонокошение выделяются значительные бюджетные средства и оно осуществляется с завидным постоянством. Однако в период засухи удаление транспирирующей фитомассы тождественно обречению растений на гибель, поскольку добыть воду из глубоких слоев растение может только за счет работы «верхнего концевого двигателя» – испарения с поверхности листьев. Так в летние периоды 2007, 2010 годов в г. Москве складывался

неблагоприятный гидротермический режим почв (засуха), приведший к повсеместной деградации газонов, обнажению и пылению почвенной поверхности, особенно вдоль автомагистралей (фото 2). На снимках, отражающих состояние газонов парковой зоны вдоль Краснопресненского проспекта в р-не Крылатского, отчетливо виден контраст между скошенными и нетронутыми участками. Проблема была вызвана как недостатком влаги в верхнем корнеобитаемом слое, так и неправильными универсальными установками по уходу за газонной растительностью в г.Москве со строго обязательной процедурой регулярного скашивания надземной фитомассы. В данном случае соседние участки вдоль дорог и тропинок с естественной растительностью без сенокошения вполне смогли пережить июньскую засуху, а обкашиваемые газоны «выгорели» на корню. Очевидно, необходима корректировка муниципальных правил содержания зеленых насаждений с внедрением строго обязательных поливов и запрещения скашивания фитомассы на период засухи. Тем самым можно сэкономить значительные средства, растрачиваемые как на ненужные виды ухода, так и на восстановление погибшей травянистой растительности московских цветников и газонов.

С проблемой водопотребления растений напрямую связан еще один эдафический фактор их роста и развития, а именно – ***минеральное питание***. Ведь основную часть биофильных элементов, необходимых для биосинтеза, растения получают в растворенном виде из почвы с током влаги, поступающей в корни. При этом активная концентрация растворимых веществ как позитивных (соединения азота, фосфора, калия, микроэлементов), так и негативных (ионы и комплексы тяжелых металлов, легкорастворимые соли противогололедных препаратов) зависит не только от их общего количества и взаимодействия с твердой фазой почв (адсорбция, хемосорбция, обменные реакции), но и от содержания почвенной влаги. Общая концентрация растворимых минеральных веществ (электролитов) может быть оценена по критерию электропроводности почвенной влаги в состоянии насыщения или близкому к нему показателю электропроводности почвенной пасты. При этом начало негативного воздействия на

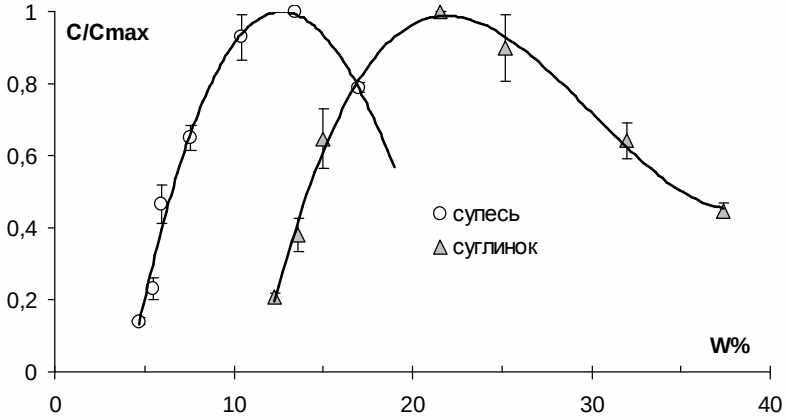


Рис.1.4. Зависимости удельной концентрации порового раствора от влажности дерново-подзолистых почв (УОПЭЦ МГУ «Чашниково»)

растительность мегаполиса высоких концентраций электролитов начинается с величин электропроводности 1,5-2 дСм/м [Смагин и др., 2006, О повышении качества, 2005]. И, напротив, при низких значениях электропроводности (менее 0,1 дСм/м) раствор следует считать обедненным питательными веществами, как например, в природных условиях – в олиготрофных болотах атмосферного увлажнения, где из-за недостатка минеральных элементов некоторые растения становятся хищниками (росянка, венерина мухоловка).

Вместе с тем даже в относительно обеспеченных компонентами минерального питания почвах могут возникать ситуации дефицита растворенных веществ в определенных интервалах содержания почвенной влаги. Наибольшая концентрация почвенных растворов, как видно из рисунка 1.4 относится к интервалу средних значений влажности, близких к так называемой максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ). При увеличении содержания влаги активная концентрация веществ может уменьшаться в 2 раза и более за счет эффекта разбавления. И наоборот, дальнейшее снижение влажности за пределами ММВ приводит к резкому падению концентрации вплоть до значений близких к нулевым из-за связывания молекул воды поверхностными силами твердой

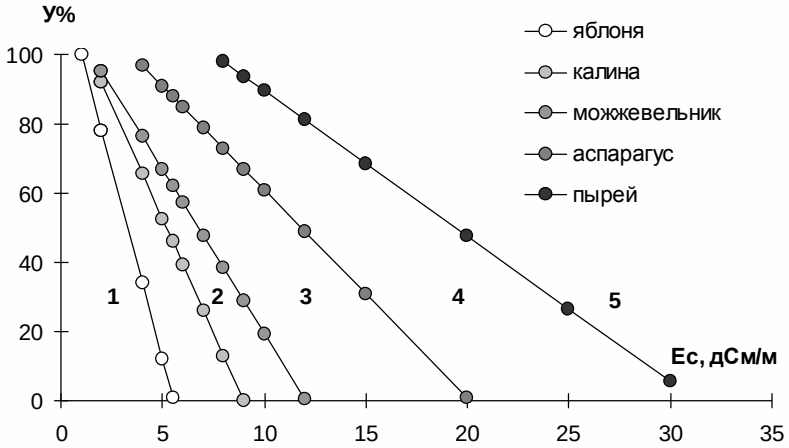


Рис.1.5. Влияние засоления на урожайность растительных культур по [Бреслер и др., 87]. Группировки растений: 1 – чувствительные (бобовые, розоцветные, орешник, плодовые: вишня, яблоня, персик, слива, лимон), 2 – средне чувствительные (картофель, подсолнечник, кабачки, огурцы, редис, кукуруза, виноград, клевер, рис, мятлик, костер безостый), 3 – слабо чувствительные (пшеница, сорго, житняк, олива, тополь, ольха, осина), 4 – толерантные (хлопок, аспарагус, финик, бермудская трава, суданская трава, овсяница, райграс, пырей), 5 – область гибели большинства наземных растений.

фазы почв (эффект нерастворяющего объема). Отсюда любые удобрения на фоне дефицита влаги в почве будут бесполезными и не смогут попасть в растения. Концентрирование же минеральных солей удобрений и противогололедных средств при иссушении почвы до состояния близкого к ММВ может приводить к гибели растений из-за осмотического шока. Так начало засоления и угнетения роста городской растительности диагностируется величиной электропроводности порядка 2 дСм/м (см. ранее). Однако эта величина определяется в состоянии насыщения почвы влагой. А при иссушении до ММВ, согласно графику 1.4, данная величина может увеличиться в два раза и более, достигнув границы засоления 4 дСм/м, характерной лишь толерантных к этому фактору растений аридных климатических условий [Maas, Hofman, 77].

Зависимость урожайности (продуктивности) растений от уровня засоленности порового раствора имеет вид У%= 100–В(Ес–А), где Ес – электропроводность насыщенного раствора в дСм/м, А,В – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида растений, У% – величина урожая в процентах от исходного уровня, когда почва не засолена [Бреслер и др., 87]. Рисунок 1.5 иллюстрирует эту зависимость для ряда растительных культур, использующихся в сельском хозяйстве и на практике городского озеленения.

К сожалению, эти результаты, полученные для аридных регионов, где засоление земель является природным бедствием, нашли неожиданное применение в казалось бы благополучных гумидных условиях крупных европейских городов. Основная причина – неумеренное использование противогололедных препаратов и химических удобрений. Еще 5-10 лет назад по официальным данным государственных докладов о состоянии окружающей среды в Москве среднегодовой расход соли на территории города составлял 300-400 тысяч тонн. Общая площадь города около ста тысяч га из которых порядка 30% приходится на открытые поверхности почв. Таким образом ежегодная нагрузка на открытые поверхности достигала 10 т соли на гектар или 1 кг/м^2! Для сравнения техногенная нагрузка в виде выпадения тяжелых металлов и иных поллютантов редко превышает первые граммы на квадратный метр, то есть в тысячу раз меньше. В результате в почвах отдельных территорий мегаполиса (придорожные, селитебные зоны) сформировался ***уровень засоления*** типичный для условий аридных приморских территорий с доминирующими величинами электропроводности порядка 4-8 дСм/м (рис. 1.6). Именно этот фактор вызвал массовую гибель древесной и газонной растительности вдоль московских дорог и домов в конце 90х годов прошлого столетия. На фотографиях 2, 3 (см Приложение) показан типичный вид придорожных газонов в этот период на придорожных участках, мало чем отличающихся от пустынных территорий с природным засолением. К настоящему моменту городские власти осознали всю серьезность данной проблемы, и все чаще на практике вместо солевых противогололедных препаратов в селитебной зоне применяют механические средства (щебень, песок), а на автомагистралях – растворы

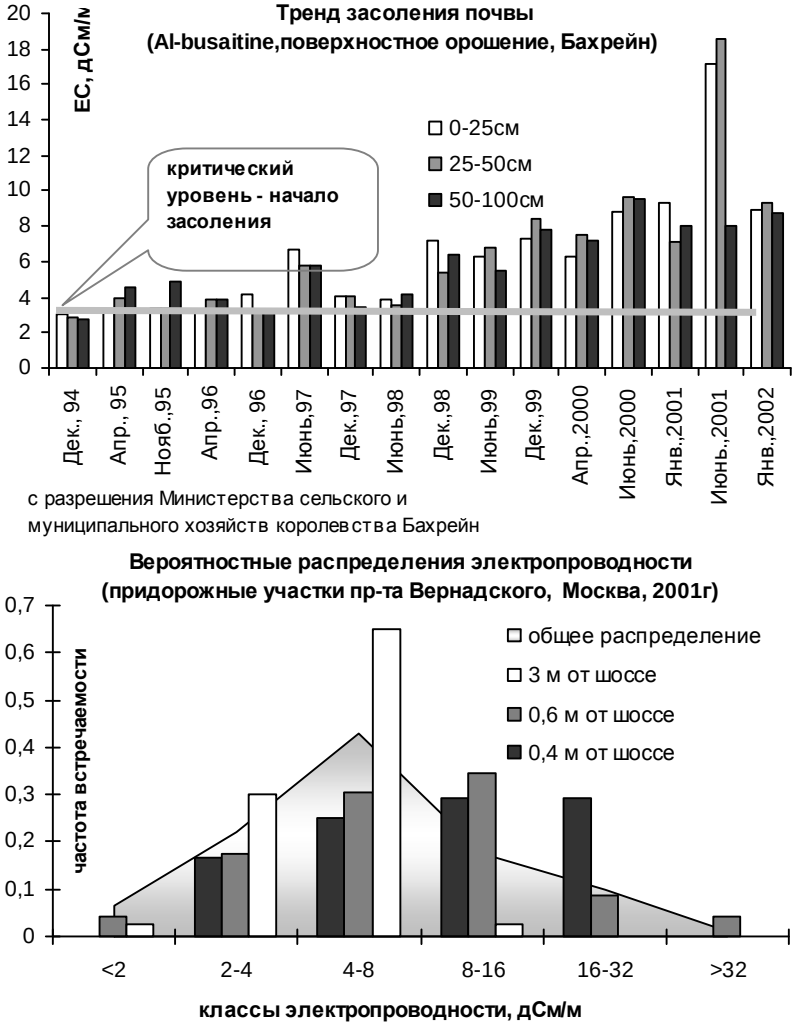


Рис.1.6. Сравнение уровней засоления почвы городских территорий в аридном (Бахрейн) и гумидном (Москва) климатах.

антифризов со значительно меньшим расходом осмотически активных веществ. Вместе с тем данный негативный фактор должен быть учтен в проектах так называемых «придорожных одежд» или специальных почвенных конструкций вдоль

автомагистралей, где наряду с аккумулятивными слоями для обеспечения растения влагой и элементами минерального питания можно создавать защитные слои-экраны в качестве превентивной меры от техногенного загрязнения и засоления [Смагин и др., 2008].

В завершении раздела остановимся на ***тепловом факторе*** жизнеобеспечения растительности. Анализируемые ранее полярно-противоположные условия аридного и гумидного климата в антропогенных ландшафтах, имеют тенденцию сходимости (конвергенции) практически по всем изучаемым факторам (водный режим – периодические засухи, солевой и кислотно-щелочной режимы – засоление и защелачивание, тепловой режим – избыточный нагрев почвы). Так, несмотря на то, что Москва является одним из наиболее приближенных к северу мегаполисов мира, в целом теплообеспеченность городской растительности здесь достаточно высокая. Это во многом связано с эффектом так называемого «острова тепла» – антропогенных и техногенных тепловых потоков, возникающих при сжигании топлива, движении транспорта, диссипации бытовой энергии, перераспределении и отражении солнечной энергии от твердых поверхностей городских зданий с высоким альбедо, а также локальным парниковым эффектом городской атмосферы. По нашим данным круглогодичного мониторинга температурного режима в г. Москве с помощью датчиков «термохрон» температура приземного слоя воздуха в центре города характеризуется существенно меньшей амплитудой варьирования по сравнению с периферийными условиями, где в течение зимнего периода неоднократно возникают экстремально низкие значения температуры воздуха до –25-30^{o}C [Экологические функции, 2004, Смагин и др., 2006, 2008]. То же касается данных мониторинга температуры русловых вод малых рек – притоков Москвы на примере р. Сетунь. На входе в город речка промерзала на длительный срок с января до первой декады марта и ее температура оставалась фактически постоянной и соответствовала точке замерзания воды. В городской черте, напротив, вода в русле реки оставалась не замерзшей даже в сильные морозы. Это связано с активным сбросом сточных и технических вод предприятиями города, находящимися в бассейне р. Сетунь.

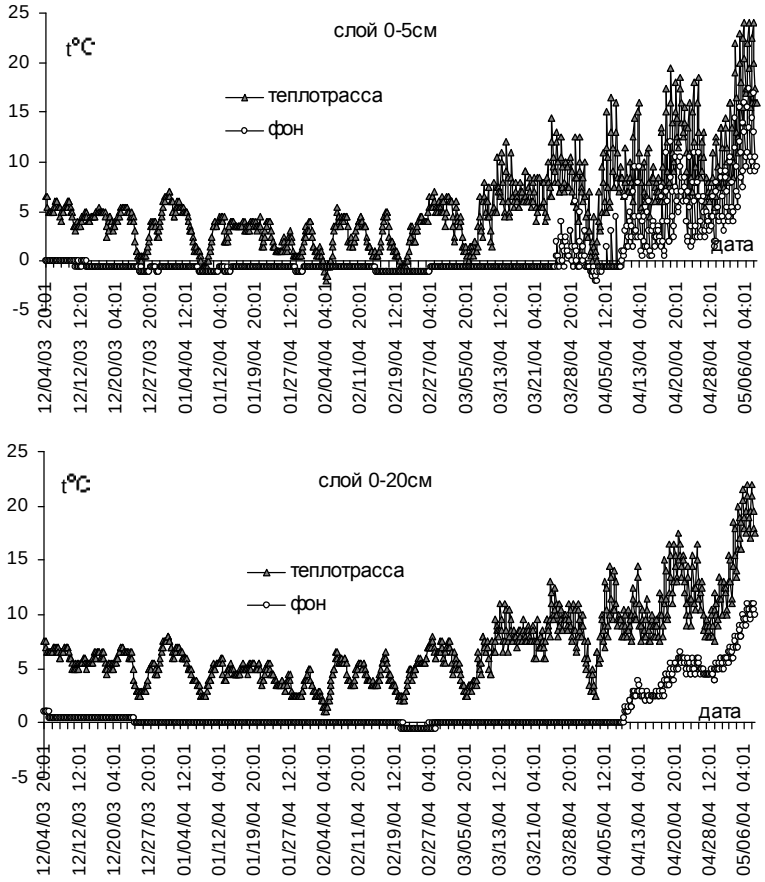


Рис. 1.7. Влияние теплотрассы на температуру почвы (г. Москва, Крылатское 2003-2004 гг) по [Смагин и др., 2008].

Сходные тенденции отмечаются и для почвенного покрова. На рисунке 1.7 приведены данные сравнительного мониторинга, направленного на выявление воздействия городских подземных коммуникаций (трубопроводов) на температурный режим городских почв (г. Москва, р-н Крылатское). Как видно из графиков температура почвы над трубопроводом стабильно выше фоновых величин для почв не нарушенных территорий, причем с глубиной различия

усиливаются и могут достигать 5-10°С. Фоновая почва промерзает и остается практически всю зиму при температурах 0-1°С, соответствующих фазовому переходу для почвенного раствора. Над теплотрассой температура почвы практически все время положительна и лишь в сильные морозы снижается за нулевую отметку. Это приводит к пролонгации биологической активности таких почв и их потенциальной деградации из-за разрушения органического вещества (гумуса) в холодные сезоны, когда отсутствует фотосинтез и соответствующий приток органики из растительного блока. Помимо того в зимний период вокруг таких трубопроводов складываются оптимальные условия для коррозии, поскольку активные микроорганизмы-деструкторы и хемосинтетики, а в особенности – агрессивные продукты их жизнедеятельности (например, сероводород) способны проникать через изолирующие материалы и разрушать металл.

Вместе с тем в отдельные периоды года в почвах мегаполиса могут возникать неблагоприятные температурные условия для растительности, особенно травянистой с локализацией корневых систем в поверхностном слое почвы, где амплитуда температурных колебаний максимальна. В качестве примера рассмотрим данные мониторинга температурного режима в м-рне Куркино за 2003-2004гг по разным функциональным элементам территории (рис.1.8) [Смагин и др., 2008]. Анализ данных показывает, что в течение вегетационного сезона вероятность благоприятного периода с повышенной теплообеспеченностью (15-20 °С) варьировала в диапазоне 18-24%, независимо от антропогенной нагрузки на почвенный покров. Неблагоприятных температурных условий в почвах в теплое время года не было, и вероятность появления температур верхнего 5см слоя почвы выше 20°С составила 0,05-0,3% (2-6 раз за 1900 случаев измерений). При этом температура воздуха достигала экстремально больших величин (28-38 °С) в 2-3% случаев измерений. Аналогичным образом за холодный период, несмотря на оттепели с положительной температурой воздуха и сильные морозы до –20-25 °С, температура почвы оставалась стабильно близкой к точке замерзания (0- –0,5 °С). То есть по отношению к холоду, равно как и к теплу почва имела большой

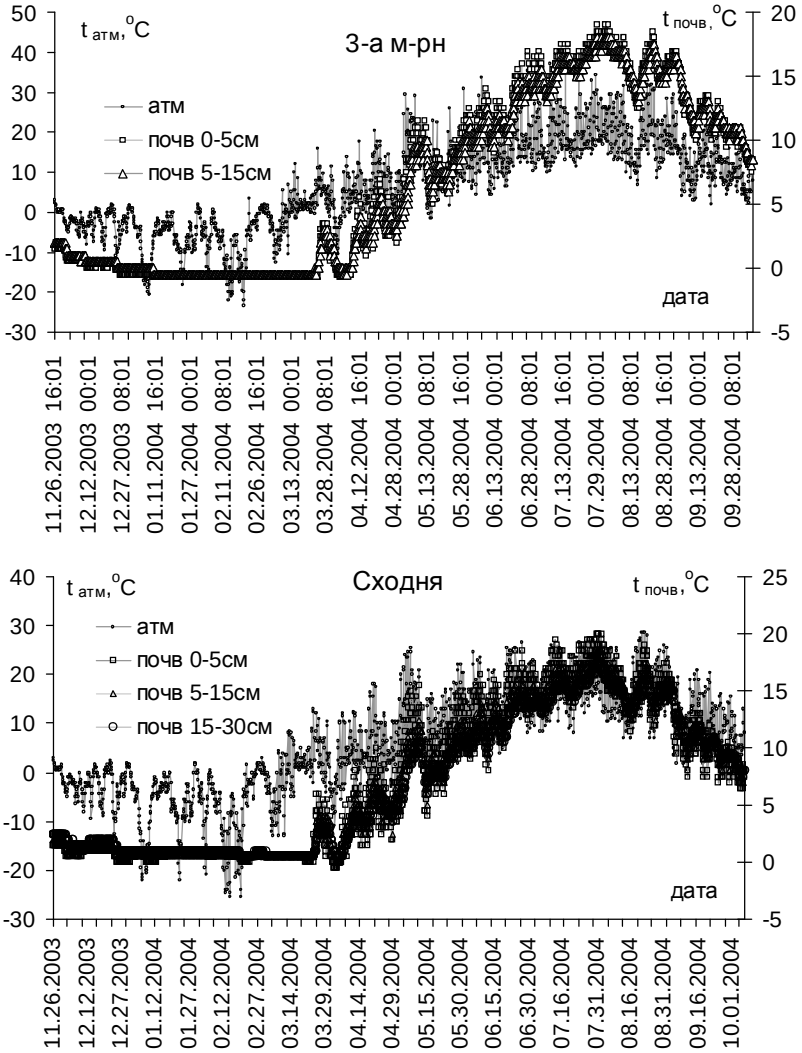


Рис.1.8. Фрагменты экологического мониторинга температурного режима почв в м-рне Куркино (2003-2004гг) по [Смагин и др., 2008].

запас буферности, позволяющий сглаживать неблагоприятные внешние воздействия.

Однако, стоит отметить, что в холодный период проявились отличия, связанные с приуроченностью почвы к той или иной функциональной зоне. В рекреационной зоне (пойма р. Сходня, парк «Березовая роща») с естественным почвенным покровом, температура верхнего 5см слоя почвы не снижалась за ноль градусов в течение всей зимы, а в более глубоких слоях 10-20см была положительной (0,5-1^{o}C). Антропогенно нарушенные почвы и реплантоземы новостроек (3-5мр-ны Куркино) промерзали до –0.5^{o}C в верхней 5см части начиная с конца декабря и в слое 10-20 см – с первой декады января, стабильно оставаясь в таком состоянии вплоть до начала апреля, несмотря на многочисленные оттепели. Причиной таких отличий служат, по-видимому, нарушение естественного рыхлого сложения почвы и небольшой снеговой покров (вплоть до его отсутствия) на урбанизированной территории. Длительное промерзание почвы, как уже говорилось, может негативно сказываться на состоянии зеленых насаждений и в первую очередь – газонов и цветников с неглубокой корневой системой растений.

Таким образом, краткий анализ почвенных факторов, контролирующих рост и развитие зеленых насаждений в мегаполисе показывает, что ведущие из них (обеспеченность пространством, влагой, теплом, элементами минерального питания) часто находятся за пределами экологического оптимума. К этому добавляется высокая вероятность засоления электролитами и техногенное загрязнение корнеобитаемого слоя. Отсюда в технологиях почвенного конструирования должны быть учтены все вышеперечисленные эдафические факторы и специфика их проявления в антропогенных ландшафтах с тем, чтобы сформировать оптимальные условия для стабильного и высокопродуктивного функционирования зеленых насаждений. При этом необходимо опираться на закономерности природной организации почв как динамических биокосных систем в потоках веществ и энергии, и в следующем разделе будут рассмотрены наиболее важные из них.

1.2. Структурно-функциональная организация почв и ее учет в проблеме почвенного конструирования.

Почву нельзя создать раз и навсегда. В природе на формирование почв и поддержание их в должном состоянии тратиться до 50% и более ежегодно синтезируемой органической продукции и биогенных потоков энергии [Хильми, 78]. При этом образование, развитие и дальнейшая динамика почв неразрывно связаны с эволюцией экосистем (биогеоценозов) в целом и во многом определяются феноменом их ***самоорганизации*** [Роде, 47, Смагин, 89].

Сущность почвообразования, согласно крылатой фразе академика В.Р. Вильямса, состоит в синтезе и распаде органических веществ. В природных условиях существует баланс между этими процессами, благодаря которому вещественный состав, структурное состояние и плодородие почв поддерживается на оптимальном для функционирования экосистем с данным типом растительности уровне. Наиболее важной составляющей этого баланса является собственно круговорот углерода – основного биофильного и структурообразующего элемента биокосных систем. Фактически образование и непрерывное возобновление почвенных ресурсов естественных экосистем, поддержание биогенного плодородия природных почв связано с динамикой органического углерода. Можно представить себе почву как структуру в потоке органического вещества, поступающего из растений (опад, отпад, корневые выделения), подвергающегося гумификации (образованию специфичных органических веществ почвы) и минерализации до углекислого газа и водных растворов солей биофильных элементов. С аккумуляцией и деструкцией органических веществ в почве тесно связаны формирование структуры, водоудерживающей и поглотительной способности, депонирование биофильных элементов и иные процессы, ответственные за почвенное плодородие. Рассмотрим закономерности биогенной организации почв на примере природных экосистем сосновых лесов Подмосковья, имеющих широкое распространение в долинах крупных рек (Оки, Москвы-реки и др.).

Возникновение почвы, ее устойчивость и функционирование подчиняется принципу самоорганизации целостной биокосной системы более высокого порядка – биогеоценоза. При этом живые организмы, стремясь сосредоточить и упорядочить в ближайшем окружении необходимые для их роста, развития и воспроизводства вещество, энергию и информацию, формируют почву, ее структуру и плодородие. Созданное многочисленными поколениями организмов биогенное плодородие реализует обратную связь – главную отличительную черту саморегулирующихся физических объектов.

Наиболее ярко указанные закономерности иллюстрируются на примере ***почв легкого гранулометрического состава*** долинных сосновых экосистем, где биогенная организация направлена на оптимизацию исходно неблагоприятных для роста и развития организмов условий – бедности мономинеральных кварцевых песков питательными веществами и их низкой водоудерживающей способности. Песчаные материнские породы представляют благоприятную среду для изучения влияния растительности на свойства создаваемых под ее воздействием почв [Ремезов и др., 59, Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 92]. Продуктивность, стабильное функционирование и воспроизводство лесных сообществ определяются главным образом биогенным плодородием, аккумуляцией ОВ, которое удерживает дефицитные питательные элементы и влагу в поверхностных горизонтах [Вайчис, Руткаускас, 71, Паулюкявичюс, 72, Плешиков, 75, Онюнас, 76, Вайчис, 81, Межлас, 89, Мигунова, 93]. В таблицах №№ 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 и на рисунке 1.9 приведены сравнительные данные по разным стадиям экогенетических сукцессий сосновых биогеоценозах на песках (стационарные объекты Серебряноборского опытного лесничества и о.Лохин в верхнем течении Москвы-реки напротив музея-усадьбы Архангельское), отражающие постепенное нарастание интенсивности поступления и депонирования веществ и энергии в формирующихся при этом почвах. Физический механизм сукцессии заключается в биогенном формировании критического уровня ОВ и связанного с ним плодородия почвы, необходимого и

Табл. 1.1 Гранулометрический состав и физические свойства песчаных почв долинных сосновых биогеоценозов Подмосковья по [Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 92].

Пар-целлы БГЦ	Гори зонт почв	Фракции, мм						$S_{БЭТ}$, $м^2/г$	ρ_b $г/см^3$	ρ_s $г/см^3$	МГ %
		> 0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005-0,001	< 0,001				
Сосняк простой овсяницево-зеленомошный на слабодерновой поверхностно(мелко)-подзолистой грубогумусной песчаной почве											
ПВ	A1E	88,03	6,89	0,08	1,82	1,44	1,74	8,38	1,31	2,62	0,85
	B	90,90	5,42	0,56	1,00	0,48	1,64	6,28	1,59	2,67	0,66
	C	94,8	3,84	0,48	0,14	0,08	0,66	2,69	1,58	2,66	0,30
ПС	A1E	89,82	4,42	1,12	2,14	1,52	0,98	6,84	1,33	2,62	0,71
ПН	A1E	95,08	0,56	1,00	1,14	1,04	1,18	5,93	1,36	2,62	0,59
Эко-тон, ПС	A1e	85,07	10,37	0,44	0,36	1,16	2,6	9,47	1,09	2,62	0,85
	B	90,73	6,73	0,08	0,32	1,5	0,64	5,13	1,56	2,66	0,55
Липо-дубо-сосняк вейниково-зеленчуковый на глубокодерновой глубокоподзолистой модермуллевой (муллевой) супесчаной почве											
Эко-тон, ПС	A1	-	-	-	-	-	-	8,76	1,18	2,60	0,89
	B	-	-	-	-	-	-	5,13	1,53	2,66	0,60
ПВ, синузия липы	A1	79,54	13,00	1,08	1,4	1,9	3,08	12,2	1,15	2,61	1,23
	E	94,17	4,07	0,04	0,16	0,04	0,92	3,22	1,42	2,64	0,37
	$B_{h,fe}$	86,05	11,13	0,12	0,7	0,04	2,28	6,91	1,69	2,69	0,75
ПВ, синузия дуба	A1	83,68	1,52	2,02	1,84	4,81	6,12	24,5	0,80	2,56	2,54
	E	82,78	15,4	0,32	0,24	0,58	0,68	3,85	1,36	2,62	0,41
	$B_{h,fe}$	87,78	9,62	0,12	0,74	0,44	1,30	5,11	1,64	2,67	0,59
	C	92,87	4,78	1,418	0,16	0,18	0,53	2,45	1,57	2,66	0,27
ПН	A1	78,67	8,55	3,36	1,76	2,78	4,88	18,3	0,87	2,60	1,74
Сосняк простой овсяницево-зеленомошный на примитивной слабодерновой поверхностноподзолистой грубогумусной песчаной почве (70 лет сукцессии)											
ПВ	A1E	40,73	46,47	8,00	1,40	1,40	2,00	11,0	1,42	2,62	1,06
	B	46,06	47,94	3,40	0,87	1,00	0,80	6,26	1,49	2,67	0,66
	C	50,32	44,88	2,40	0,70	0,70	1,00	6,17	1,49	2,67	0,65

Примечание: здесь и далее ПВ, ПС, ПН – парцеллы вершинных, склоновых и низинных элементов биогеоценозов, экотон – переходные участки на границе простых и сложных боров; $S_{БЭТ}$, ρ_b, ρ_s, МГ – удельная поверхность, плотности почвы и ее твердой фазы, максимальная гигроскопичность.

достаточного для поселения новых более требовательных видов растений, интенсифицирующих биологический круговорот веществ и энергии [Смагин, 2007]. Пионерные сообщества (простые сосняки с бореальным кустарничково-моховым покровом), осваивающие свежие эолово-аллювиальные песчаные отложения, сосредотачивают основной запас жизненно-важных веществ в составе собственной живой массы и детрита (подстилки). Это связано с самой природой вечнозеленых хвойных пород и зимне-зеленых доминантов напочвенного покрова – кустарничков, мхов, вегетативная масса которых отмирает не полностью за год, а лишь частично, с полным оборотом вещества раз в 3-5лет. Только в составе фитомассы травяно-кустарничкового и мохового покровов сосредотачиваются значительные количества химических элементов, ранее рассеянных по всей толще материнской породы (табл. 1.3, 1.4). Так, в зеленых мхах, фитомасса которых достигает 200-300г/м^2, заключено 3,5-5,0 г/м^2 N, 1-1,5 г/м^2 P, 2-3 г/м^2 K, 0,2-0,5 г/м^2 Ca и Mg, 0,5-0,7 г/м^2 Mn и до 3-4 г/м^2 Fe и Al. С ежегодным опадом растительности на поверхность почвы поступает 270±25г/м^2 органического вещества, содержащего 3,5±1 г/м^2 кальция, 1,7±0,3 г/м^2 азота, 0,3-0,6 г/м^2 фосфора, калия, магния и других химических элементов (рис. 1.9). Опад хвойных и зимне-зеленых растений, благодаря большой доли полифенольных соединений, воско-смол (экстрактивное вещество) и других трудногидролизуемых соединений разлагается достаточно медленно, способствуя формированию больших (до 40-80т/га) запасов детрита на поверхности почвы (табл.1.5). Низкие скорости разложения детрита суть необходимый фактор устойчивого функционирования биокосной системы, обеспечивающий концентрацию питательных веществ и влаги в верхнем слое почвы и максимальное сопротивление выносу в условиях хорошей дренируемости песков. Полученная структура способствует

Табл. 1.2. Характеристика химических свойств песчаных почв сосновых биогеоценозов Подмосковья по [Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 92]

Объект, парцеллы БГЦ	Горизонт почв	Гумус %	N %	P_2O_5 %	Обменные, мгэкв/100г		pH водн
					Ca^{2+}	Mg^{2+}	
Сосняк простой овсяницево-зеленомошный на слабодерновой поверхностно(мелко)-подзолистой грубогумусной песчаной почве							
ПВ	A0	-	0,36	0,09	14,0	3,6	3,5
	A1E	2,22	0,08	0,10	1,5	1,3	3,9
	B	0,36	0,01	0,02	1,0	0,6	5,5
	C	0,07	следы	0,03	1,2	0,4	5,8
ПС	A0	-	0,42	0,11	13,5	6,5	3,6
	A1E	2,35	0,12	0,09	1,4	1,9	3,9
Экотон, ПС	A0	-	0,54	0,17	14,1	4,0	3,7
	A1e	2,96	0,13	0,10	1,5	1,2	4,0
Липо-дубо-сосняк вейниково-зеленчуковый на глубокодерновой глубокоподзолистой модермуллевой (муллевой) супесчаной почве							
Экотон, ПВ	A0	-	0,66	0,10	18,5	5,6	4,3
	A1	2,36	0,18	0,1	1,6	0,9	4,0
ПВ, син.липы	A0	-	0,95	0,19	18,7	5,6	4,9
	A1	3,40	0,27	0,12	2,1	1,2	4,4
ПВ, синузия дуба	A1	4,36	0,50	0,14	3,3	2,6	5,2
	E	0,34	следы	0,03	0,3	0,4	4,9
	$B_{h,fe}$	0,66	0,06	0,05	0,8	0,5	5,0
	C	0,10	0,02	0,02	1,0	0,8	5,7
ПН	A0	-	0,68	0,12	31,3	7,3	5,8
	A1	4,12	0,42	0,11	3,1	1,2	5,5
Сосняк простой овсяницево-зеленомошный на примитивной слабодерновой поверхностноподзолистой грубогумусной песчаной почве (70 лет сукцессии)							
ПВ	A0	-	0,39	0,10	16,3	4,1	4,4
	A1E	2,66	0,08	0,06	2,1	2,2	4,0
	B	0,60	0,03	0,02	1,1	1,5	4,4
	C	-	0,02	0,01	1,3	2,0	5,0

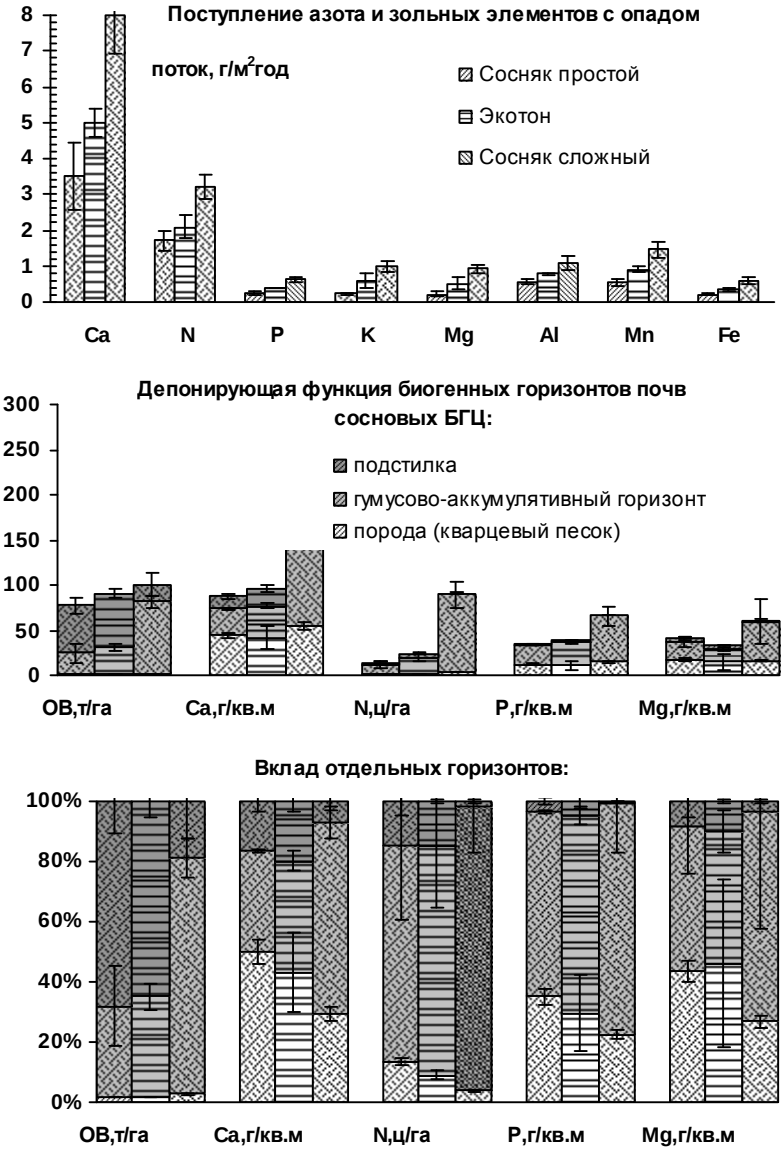


Рис.1.9. Стационарные исследования биогенной организации долинных сосновых экосистем на почвах легкого гранулометрического состава по [Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 93, Смагин, 2007]

Табл. 1.3. Надземная фитомасса (г/м^2) растений напочвенного покрова сукцессионного ряда по [Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 92]

Виды и эколого-фитоценотические группы растений	Парцеллы							
	ПВ	ПС	ПН	ПС	ПВ	ПВ	ПС	ПН
Сосняк простой вейниково-зеленомошно-овсяницевый				***Экотон***	***Липо-дубо-сосняк сложный вейниково-зеленчуковый***			
Боровые и таежные:								
брусника	2,6	4,0	4,2	11,9	2,6	2,4	-	-
вереск	10,8	1,7	8,5	-	-	-	-	-
черника	-	-	14,5	3,4	-	8,7	1,8	1,4
Итого	13,4	5,7	27,2	15,3	2,6	11,1	1,8	1,4
Березняковые и лугово-лесные:								
вейник лесной	21,3	36,3	27,0	43,1	20,4	13,7	3,1	1,0
овсяница овечья	11,0	2,5	6,1	0,4	-	-	-	-
разнотравье	2,5	4,9	11,2	9,1	12,1	17,2	8,5	29,1
Итого	34,8	43,7	44,3	52,6	32,5	30,9	11,6	30,1
Неморальные:								
зеленчук	-	-	-	2,4	3,6	8,8	10,4	12,5
сныть	-	-	-	-	-	-	3,7	8,9
пролесник	-	-	-	-	0,4	6,1	7,9	3,6
хохлатка	-	-	-	-	0,5	3,6	3,2	3,9
Итого	-	-	-	2,4	4,5	18,5	25,2	28,9
Всего трав и кустарничков	48,2	49,4	71,5	67,9	39,6	60,5	38,6	60,4
Мхи:								
Pleurozium schreb.	175,6	40,6	69,1	-	4,8	15,7	21,5	-
Dicranum poiyset.	136,4	206,6	202,2	15,2	-	-	-	-
Polytrichum junip.	66,6	-	-	-	-	-	-	-
Brachythecium star.	-	12,8	-	13,6	9,3	11,6	9,7	1,7
Итого	378,6	260,0	271,3	28,8	14,1	27,3	31,2	1,7
Всего	426,8	309,4	342,8	96,7	53,7	87,8	69,8	62,1

Табл. 1.4. Запасы азота и зольных элементов в фитомассе напочвенного покрова (г/м^2) по [Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 92]

Парцел-ла	Фито-масса	Сос-тав	N	P	K	Al	Mg	Ca	Mn	Fe
Сосняк простой вейниково-зеленомошно-овсяницевый										
ПВ	48,2	Куст, травы	0,73	0,21	0,95	0,03	0,11	0,12	0,12	0,01
	378,6	Мхи	5,07	1,44	2,72	3,86	0,34	0,50	0,72	3,79
ПС	49,4	Куст, травы	0,85	0,27	1,28	0,02	0,11	0,11	0,15	0,01
	260,0	Мхи	3,46	0,99	1,87	2,65	0,24	0,34	0,49	2,48
ПН	71,5	Куст, травы	1,10	0,33	1,36	0,05	0,19	0,36	0,20	0,01
	271,3	Мхи	3,64	1,03	1,94	2,76	0,24	0,35	0,51	2,71
ПС Эко-тон	67,9	Куст, травы	1,14	0,37	1,62	0,04	0,19	0,21	0,21	0,01
	28,8	Мхи	0,38	0,11	0,21	0,30	0,02	0,04	0,06	0,29

удержанию существенно больших количеств элементов питания и влаги по сравнению с исходным грунтом, причем значительная часть биогенно накопленных веществ локализуется в подстилке (табл. 1.2, 1.5, рис.1.9). Суммарно в горизонтах A_0, A1E накапливается 100-150 г/м^2 биогенного азота, 20-40 г/м^2 фосфора, магния и кальция, фиксируется около 100мм влаги, что в 2-6 раз превышает аналогичные характеристики для слоя материнской породы той же мощности. Повышенная водоудерживающая и поглотительная способность аккумулятивных горизонтов связана с накоплением органических коллоидов, увеличивающих втрое дисперсность (удельную поверхность) минеральных горизонтов с 2 до 6 м^2/г (табл. 1.1) и, соответственно, поверхностную энергию водоудерживания. Запасы последней возрастают в 3-4 раза с 14-15 МДж/га в породе до 50-60 МДж/га в горизонтах A_0 и A1E адекватной мощности (рис.1.9). Часть поверхностной энергии тратится на взаимодействие частиц друг с другом, в результате чего в горизонтах A1E возникают зачатки агрегатной структуры [Смагин, 93].

В качестве промежуточной стадии развития может быть рассмотрена почва 70-летнего песчаного карьера в

Серебряноборском опытном лесничестве (табл. 1.1, 1.2). За 70 лет сукцессии и почвообразования под простым сосновым БГЦ в органогенных горизонтах почвы накапливается 0,08-0,4% N, 0,06-0,1% P_2O_5, 3-16 мг-экв обменных Ca^{2+} и Mg^{2+}, что в 3-10 раз превышает исходные концентрации в материнской породе. В целом полученные результаты подтверждают положение о биогенной аккумуляции химических элементов в формирующихся почвах как главном средстве регуляции несоответствия между ежегодным спросом растений на питательные вещества и их наличием в исходном субстрате [Ильин,88].

На определенных рубежах эволюции накопленное биогенное плодородие позволяет поселиться широколиственным породам (липа, дуб) и неморальным компонентам напочвенного покрова (сныть, зеленчук, пролесник) с богатым элементами питания и хорошо разлагающимся ежегодным опадом. Изменения в составе фитомассы доминирующих видов нижних ярусов отражены в таблице 1.3.

Одна из возможных причин смены видов состоит в угнетающем влиянии опада широколиственных пород и трав на кустарнички и мхи [Сахаров, 39, Травникова, 59]. Как видно из рис.1.9 в опаде сложного сосняка по сравнению с простым, запасы азота и фосфора возрастают в 1,5-2 раза, калия, кальция и магния в 3-4 раза. Происходит концентрация зольных элементов, накопление органического углерода и азота, на единицу увеличивается pH среды, т.е. осуществляется биогенное повышение степени трофности почвы. Сравнивая суммарные запасы вещества, заключенного в аккумулятивных горизонтах почв простых и сложных сосняков, можно констатировать увеличение количества углерода в 1,5-2, азота в 4-6, фосфора, обменных кальция и магния, энергии водоудерживания и среднегодовых запасов влаги в 2-3 раза (рис. 1.9).

Основное количество химических веществ, формирующих высокий уровень плодородия в почвах сложных сосняков концентрируется в минеральных горизонтах А1, тогда как в простых сосняках, значительная доля веществ заключена в грубогумусной подстилке. В ходе сукцессии происходит

Табл. 1.5. Характеристика аккумулятивных горизонтов почв сосновых биогеоценозов по [Ильинская, Смагин, 89, Смагин и др., 92]

Парцелла	Горизонт	Мощность или запас ОВ	C	N	Экстр.	Лигнин	OCH_3	$\frac{C}{N}$	$\frac{OCH_3}{Лигнин}$
			% от массы почвы						
Сосняк простой вейниково-зеленомошно-овсяницевый									
ПВ	А0	44,3±16 т/га	30,6	0,36	13,1	27,9	3,56	85,0	0,13
	А1Е	7,4±1,7 см	1,4	0,08	3,8	0,95	0,13	17,5	0,14
ПС	А0	82,6±37,2 т/га	26,7	0,42	12,7	33,0	3,54	63,6	0,11
	А1Е	6,9 ±2,4 см	2,2	0,12	4,2	1,22	0,18	18,3	0,15
Экотон, ПС	А0	66,4±49,4 т/га	31,3	0,54	10,9	24,5	2,32	58,0	0,09
	А1е	10,2±1,5 см	2,7	0,17	2,4	1,23	0,16	15,9	0,13
Липо-дубо-сосняк сложный вейниково-зеленчуковый									
Экотон ПВ	А0	17,5±12,4 т/га	21,8	0,15	6,9	23,4	1,85	62,3	0,08
	А1	10,8±2,3 см	1,6	0,23	1,7	2,21	0,29	7,0	0,13
ПВ	А0	52,0±74,4 т/га	28,5	0,66	7,0	25,6	2,28	43,2	0,09
	А1	24,0±4,4 см	3,5	0,18	2,4	3,21	0,31	19,4	0,10
ПС	А0	27,5±19,0 т/га	30,0	0,68	7,4	26,2	2,15	44,1	0,08
	А1	20,0±3,9 см	4,0	0,42	2,2	3,52	0,32	9,5	0,09

постепенное снижение запасов подстилки с 40-80 до 15-30 т/га, однако это количество остается выше, чем в сложных сосняках соседних древних террас на территории Серебряноборского лесничества [Рысин, 69, 74, Судницина, 87], что отражает меньшую интенсивность биологического круговорота на ранних этапах долинного лесообразования. По мере разложения детрита, высвобождающиеся биофильные элементы

закрепляются в минеральном горизонте, чему способствует не только рост концентрации и запасов органического углерода (табл. 1.2, 1.5, рис. 1.9), но и его качественное преобразование. В почвах сложных боров гумус приобретает модермуллевый характер, который подтверждается морфологическими, а также аналитическими показателями: снижением отношений C:N и OCH_3 к лигнину (табл.1.5) Отношение OCH_3/лигнин использовалось в качестве показателя состояния органического вещества, поскольку лигнин – основной источник лесного гумуса, а интенсивность его гумификации прямо пропорциональна деметоксилированию [Браунс Ф., Браунс Д., 64, Орлов, 85]. Аккумуляция мягкого гумуса приводит к существенному росту дисперсности (удельная поверхность до 20-30 $м^2$/г), энергии водоудерживания (до 150-200 МДж/га), среднегодовых запасов влаги (250-300мм) и к формированию достаточно прочной комковатой структуры (табл. 1.1. рис. 1.9).

Сосредоточенные во мхах, опаде и грубогумусном детрите значительные количества железа и алюминия (табл.1.4, рис.1.9), по мере разрушения старого сообщества постепенно иллювиируются в нижние горизонты под влиянием нейтрализации кислой среды мягким опадом широколиственных пород, способствуя дифференциации профиля по дерново-подзолистому типу. В целом, сукцессия долинных простых сосняков на кварцевых песках в сложные боры сопровождается постепенным исчезновением горизонта A_0 и дифференциацией гумусового-элювиального горизонта A1E на собственно гумусовый A1 и элювиальный E. В иллювиальных горизонтах сложных боров накапливается до 1,2-1,9% Fe_2O_3 при достаточно высоком (0,6%) содержании гумуса. По-видимому, формирование иллювиальных горизонтов, помимо депонирования элементов-шлаков, способствует в песчаных почвах с провальной водопроницаемостью дополнительному удержанию влаги и питательных веществ, наряду с основным механизмом фиксации в аккумулятивных биогенных горизонтах. В работах [Рысин, 69, Мигунова, 93, Гаель, Смирнова, 99] убедительно показана положительная роль псевдофибровых новообразований в песчаных лесных почвах, оптимизирующих как водное, так и минеральное питание древостоя.

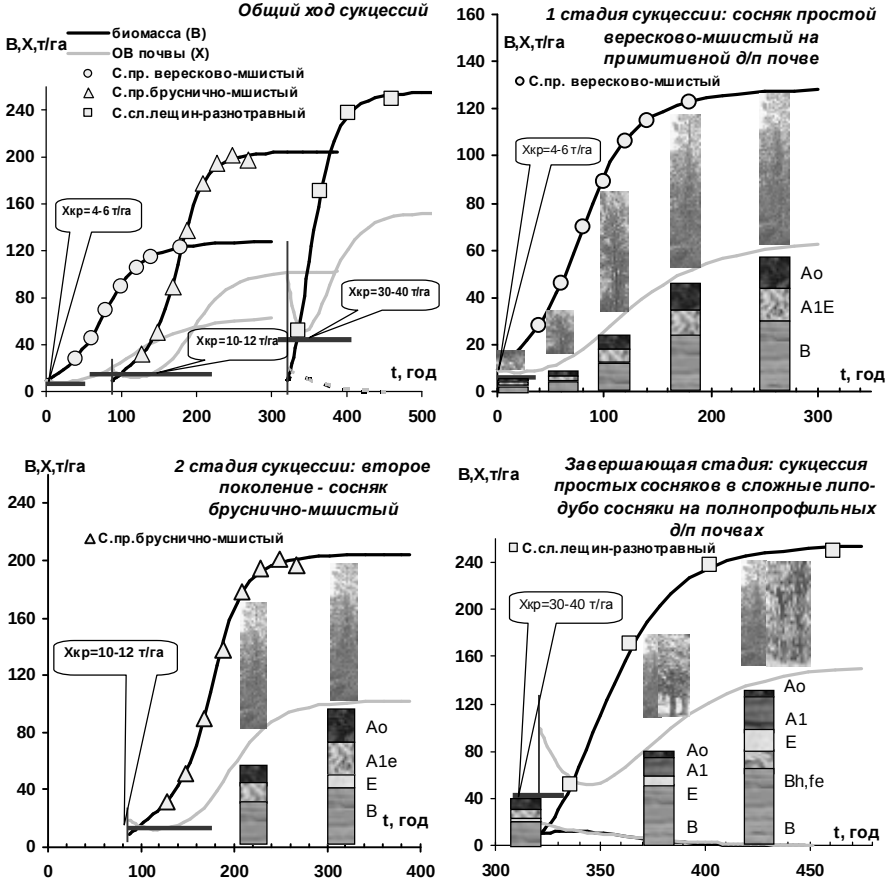


Рис. 1.10. Численное моделирование триггерного механизма сукцессионных смен долинных сосновых экосистем Подмосковья по [Смагин, 2007]. Бифуркационный параметр – количество накопленного системой органического вещества (ОВ) почвы (уровень биогенного плодородия).

Таким образом, констатируемые эволюционные изменения почвы выражаются в биогенном повышении уровня плодородия, снижении запасов подстилки, росте минерального гумусового горизонта и в дифференциации профиля. Эти изменения детерминированы пространственно-временной

самоорганизацией лесных экосистем на легких отложениях. Концентрация и закрепление веществ в фитомассе бореальных растений и трудно разлагающейся подстилке, необходимые в условиях повышенной водопроницаемости почв, определяют простую структуру профиля на начальных стадиях сукцессии.

Внедрение широколиственных пород и неморальных трав и накопление достаточного уровня плодородия способствуют развитию сложных боров с ежегодным отмиранием легко разлагающейся лиственной массы и формированию полнопрофильной почвы. Исследования позволяют констатировать смену вида почвы и типа гумуса по действующим классификациям. Слабодерновая поверхностно (мелко)-подзолистая слабодифференцированная грубогумусная почва сосняков простых эволюционирует в глубокодерновую глубоко-подзолистую модермуллевую (муллевую) почву сложных боров. Изложенный механизм иллюстрируется численными экспериментами с предложенной в работе [Смагин, 2007] триггерной моделью самоорганизации сосновых БГЦ на почах легкого гранулометрического состава (рис. 1.10). По соотношению скоростей синтеза и деструкции органической массы, детерминированных в первую очередь генотипом и видовым составом входящих в биоценоз организмов, оцениваются критические значения запасов органического вещества (ОВ) почвы, биогенное накопление которых на предшествующих этапах сукцессионной динамики обеспечивают возможность подселения более требовательных видов и дальнейшее развитие экосистемы до инвариантного состояния. Так исходный уровень ОВ с удерживаемыми им биофильными элементами должен быть не менее 4-6 т/га, что дает старт устойчивого развития нетребовательных к минеральному питанию простых боров на песчаных аллювиальных субстратах. За два поколения леса (300-350лет) успевает сформироваться дифференцированная дерново-подзолистая почва и если запас ОВ в ней превышает 30-40 т/га, создаются условия для начала сукцессии простых сосняков в сложные. В противном случае (нехватка элементов питания) занесенные на данную территорию зачатки (семена, плоды) широколиственных пород и неморальной растительности неминуемо гибнут, не имея возможности развиваться до

взрослого состояния. В целом экогенетическая сукцессия простых боров в сложные сопровождается акселерацией биологического круговорота, продуктивности и биоразнообразия на уровне доминантов, а также структурно-функциональной дифференциацией почвы и фитоценоза (биогеогоризонты, ярусность, синузиально-парцеллярная структура).

Итак, на бедных минеральными элементами песках с низкой дисперсностью и водоудерживающей способностью биогенная организация направлена на устранение этих неблагоприятных явлений посредством аккумуляции органических биополимеров в виде лесной подстилки (детрита), а в дальнейшем – по мере развития лесных экосистем – в форме мощных гумусовых горизонтов, удерживающих необходимые для роста и развития требовательных широколиственных пород и неморальных травянистых растений количества влаги и питательных элементов.

По иному складывается ситуация на ***тонкодисперсных почвах и грунтах*** суглинистого и глинистого гранулометрического состава. Там исходно может быть достаточно высокая водоудерживающая способность и обеспеченность элементами питания растений, но при этом низкая водопроницаемость и недостаточная аэрированность корнеобитаемой зоны особенно в периоды частых осадков. Верхние слои таких почвогрунтов размокают, набухая до предельных величин влагоемкости, перестают пропускать воду вглубь почвенной толщи, и растения начинают испытывать угнетение роста из за недостатка кислорода воздуха и анаэробного образования токсичных веществ. Биогенная организация здесь направлена на формирование специфической почвенной структуры в виде мелких агрегатов (зерен, комков) органоминеральной природы, в которых удерживается влага и питательные элементы, а по образовавшемуся при этом транспортному пространству (межагрегатой пористости) происходит сброс избыточной влаги вглубь почвы вплоть до подземных водоносных горизонтов и также поступление воздуха (аэрация). В природе такая структура свойственна прежде всего почвам черноземного ряда, где она формируется под действием степной и луговой форм травянистой

растительности с мощными корневыми системами – основным источником поступления органических веществ-биополимеров. Помимо гумусовых (перегнойных) веществ для получения оптимальной почвенной структуры нужны и определенные условия увлажнения, избыток двухвалентный ионов-коагуляторов, особенно кальция, деятельность почвенной биоты, в первую очередь дождевых червей, нейтральная или слабощелочная реакция среды и ряд иных сопутствующих факторов и процессов. Земледельцы давно распознали ведущее значение агрегатной структуры в плодородии и урожайности на почвах утяжеленного гранулометрического состава и научились получать и поддерживать ее в процессе окультуривания почв. Еще недавно значительная часть агрикультурных мероприятий земледельческой практики (внесение навоза, извести, пожнивных остатков и компостов, посев многолетних трав, сидератов, использование вермикультуры) была направлена на достижение этой цели. К сожалению, общая тенденция прошлого столетия, продолжающаяся и поныне, состояла в ложной переориентировке земледелия на якобы новые интенсивные технологии с мощной химизацией, увлечением легкорастворимыми минеральными удобрениями и ядохимикатами при фактическом отказе от органических веществ в необходимых дозах и формах. Результаты не замедлили сказаться и из за разбалансировки углеродного цикла (недостатка поступления органических веществ) пахотные черноземы потеряли за последние 100-150 лет интенсивной эксплуатации до 30% и более исходного содержания гумусовых веществ [Кирюшин и др., 93, Возможности современных.., 2000, Антропогенная эволюция.., 2000, Смагин, 2001, 2009]. Детальный мониторинг динамики гумусного состояния черноземов с учетом пространственного варьирования выявил статистически достоверное уменьшение содержания гумуса на 0,3-0,6% органического углерода за 20 лет [Сорокина, Когут, 92]. Сходная информация о потерях гумуса в 1-3% за 70-100 лет содержится в обзорах зарубежных ученых [Bridges, Batjes, 96].

Для выявления механизмов подобных деградационных явлений обратимся к таблице 1.6, где анализируются темпы продукционного процесса, поступления растительных остатков и образования гумусовых веществ в естественных степных

Таблица 1.6 Некоторые показатели продукционного процесса и трансформации органического углерода черноземных ландшафтов Приазовья по [Смагин, 2009].

Процесс/объект	АЗС	РТП	ОП
Гросс-продукция, гС/м^2/год	785	389	121
Опад корневой и наземный, гС/м^2/год	515	412	65
Образование гумуса, гС/м^2/год,	22,2	20,5	7,7
в том числе из корневого опада,	18,3	11,7	5,0

экосистемах на черноземах и их активно эксплуатируемых сельскохозяйственных аналогов. Как видно, общая продукция органической массы фитоценоза абсолютно заповедной степи составляет 785 гС/м^2, из которых лишь 22,2 гС/м^2 (2,8%) закрепляются в почве в виде новообразованных гумусовых веществ. Можно принять последнюю цифру в качестве эталонной для интенсивности формирования гумусовых веществ при естественном черноземообразовательном процессе. Заметим, что близкие оценки темпов депонирования органического углерода в почвах и торфяных залежах приводятся в работах [Кирюшин и др., 93, Вомперский, 95].

На участке выпасаемой степи при существенно меньших величинах биопродуктивности (389 гС/м^{2}год) в почву поступает близкое к эталонному количество органического углерода гумуса (20,5 гС/м^{2}год). Использование степных угодий под пашню с выращиванием озимой пшеницы резко снижает как биопродуктивность (121 гС/м^{2}год), так и поступление в почву органического углерода гумусовых веществ (7,7 гС/м^{2}год). Очевидно, слабо эксплуатируемое пастбище является оптимально функционирующим БГЦ, так как остающейся после отчуждения (выпаса или сенокоса) продукции вполне достаточно для эталонного гумусообразования. Агроценоз функционирует неэффективно, так как разложение всей годовой продукции растительного вещества обеспечивает создание лишь 35% эталонного для черноземообразования количества гумуса.

Полученные экспериментальные данные, а также данные о среднестатистических профильных распределениях гумуса в черноземах из работы [Антропогенная эволюция.., 2000] были положены в основу информационного обеспечения

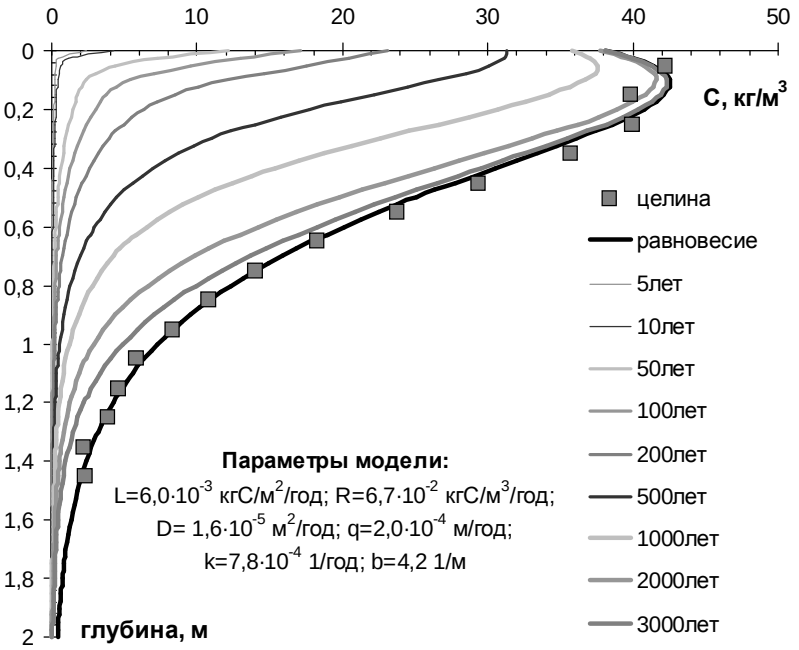


Рис. 1.11. Моделирование формирования чернозема обыкновенного под степной растительностью по [Смагин, 2009].

оригинальной модели динамики гумусового профиля черноземов [Смагин, 2001, 2009]. С ее помощью было проведено численное моделирование формирование черноземных почв под естественной степной растительностью и их агрогенной деградации при вовлечении в интенсивное сельскохозяйственное использование (рис. 1.11, 1.12). Как видно, на формирование органопрофиля, свойственного целинным черноземам обыкновенным с проникновением гумуса до глубины 1,5 и более метров, требуется не менее 2-3 тысяч лет! Лишь по прошествии этого срока гумусовый профиль выходит на равновесное (стационарное) состояние в котором процессы поступления, перераспределения и деструкции органических веществ характеризуются балансом

интенсивностей. Половина от равновесного содержания гумуса образуется за срок порядка 500-1000 лет, что соответствует оценке периода полураспада углерода гумусовых веществ в 890 лет. Таким образом, если принять за основу используемую в модели [Смагин, 2009] классическую концепцию Ломоносова-Докучаева о естественно-наземном происхождении черноземных почв и считать адекватной экспериментальную оценку эталонной интенсивности гумусообразования под естественной степной растительностью в 20-22 гС/м^2/год, следует признать, что русские черноземы формировались в течение нескольких тысячелетий, уступая по темпам аккумуляции и запасам органического углерода, пожалуй только бореальным болотным экосистемам.

Сократив в численном эксперименте с моделью общее поступление гумуса до 0,0077 кгС/м^2/год или 7,7 гС/м^2/год против исходных 22 гС/м^2/год, что соответствует трехкратному снижению интенсивности гумусообразования при распашке целинных черноземов и вовлечении в производство зерновых культур (табл. 1.6) получим результаты прогноза агрогенной деградации среднестатистического чернозема обыкновенного (рис.1.12). Существенное снижение концентрации органического углерода в верхних горизонтах почвы (до 10 кгС/м^3) наблюдается уже в первые 100-200 лет, что хорошо соответствует реальным данным о потерях гумуса в пахотных черноземах обыкновенных (треугольные символы), приводимым в [Антропогенная эволюция.., 2000]. Со временем деградация затрагивает все более глубокие слои; характерный для объемного содержания органического вещества черноземов экстремум смещается с отметок 5-10см до 40 см глубины и постепенно сглаживается. При этом никакой стабилизации потерь гумуса после 100-200 лет, на которую уповают многие современные агропочвоведы, не происходит. Оно и понятно, поскольку стабилизация органопрофиля может наступить только при новом балансе интенсивностей поступления, деструкции и транслокации органических веществ. Троекратное снижение поступления гумусовых веществ из растительного блока, характерное для агроценозов на распаханных черноземах по сравнению с целиной, будет иметь в пределе свой инвариант (стационарный органопрофиль), к которому придет

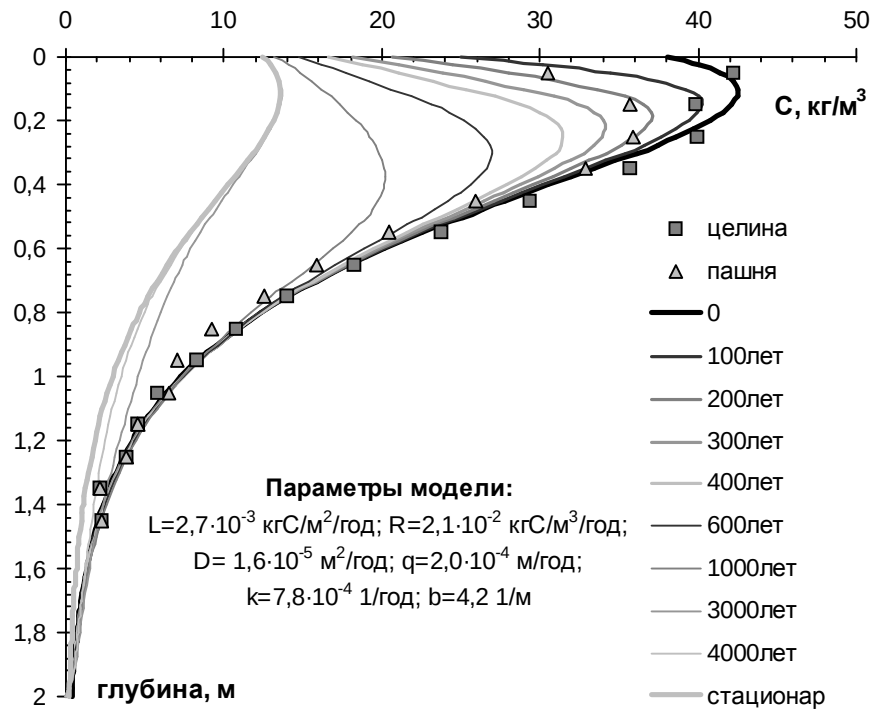


Рис. 1.12. Моделирование антропогенной деградации чернозема обыкновенного по [Смагин, 2009].

распределение органического углерода через 3000-4000 лет (крайние левые кривые на рис. 1.12). Только можно ли считать такую почву черноземом, если концентрация органического углерода в корнеобитаемой толще уменьшиться с 40 до 10 кгС/м^3, а общие запасы в 2м профиле (интеграл профильного распределения) от 28 кгС/м^2 (490 т/га гумуса) до 10 кгС/м^2 (170 т/га гумуса)?

Постепенно, но неуклонно теряется главное национальное богатство, наиважнейший ресурс, от которого напрямую зависит продовольственная безопасность страны, здоровье и благосостояние ее населения. И остановить эти потери возможно только при переходе на альтернативные системы земледелия, в которых наряду с получением высоких урожаев

должны быть заложены цель и механизмы воспроизводства почвенного ресурса, его гумусного и структурного состояния.

Как показывают экспериментальные исследования (табл. 1.6), эталонное количество ежегодно образуемых «свежих» гумусовых веществ в черноземах обыкновенных составляет величину порядка 20-22 гС/м^2, причем она характерна как для заповедных целинных экосистем, так и для умеренно эксплуатируемых пастбищ. Объяснение этому факту состоит в том, что основное количество ОВ в степных БГЦ поступает из корневых остатков, и в реальной степи в прошлом никогда не было «абсолютно заповедного режима». Роль современных выпасаемых животных играли дикие крупные копытные – степные зубры, бизоны, тарпаны, туры, исчезнувшие в настоящее время. В более позднее время их заменили стада кочевников. Для пахотных черноземных земель прошлого поддержание гумусного состояния и структуры обеспечивалось ежегодным внесением навоза при минимуме минеральных удобрений и системой ротации пахотных участков, залежей и пастбищ. В результате за тысячелетний период той или иной эксплуатации азиатских степей Россия не утратила плодородия черноземов, тогда как за 100-150 лет интенсивного, преимущественно «химического» земледелия, вплоть до настоящего времени, потери стали катастрофическими.

Почему же столь опасна тенденция агрогенной деградации черноземов с потерей гумуса? Ведь напрямую гумус не определяет продуктивность, и при интенсивных технологиях земледелия как показывает практика можно получать высокие урожаи и на лишенных прежнего гумусного состояния черноземных почвах. С органическим веществом, как уже отмечалось, тесно связаны определяющие плодородие показатели структуры, поглотительной и водоудерживающей способности почв. Согласно корреляции содержания гумуса и емкости катионного обмена, приведенной в [Быков, 83], диагностируемые на современном этапе потери ОВ черноземов эквиваленты снижению на 10-20 мг-экв/100г ЕКО а вместе с ней фактически 30% фонда биофильных элементов, формирующих урожай.

Еще более опасным явлением для периодически испытывающих дефицит влаги почв степной зоны является

потеря их водоудерживающей способности. Вклад органического вещества в формирование водоудерживающей способности черноземов варьирует от 50 до 80% от общей величины водоудерживания со стороны минеральных и органических компонентов твердой фазы [Смагин и др., 2004]. В работах [Смагин и др., 2004, Смагин, 2009] были получены и проанализированы функции водоудерживающей способности чернозема обыкновенного (Курск), в трех вариантах природопользования – целинная степь (заповедный режим), пашня под зерновые культуры и вечный пар. Наибольшим водоудерживанием, как и следовало ожидать, обладает почва целинной степи. Полная влагоемкость здесь превышает 70%, а наименьшая – 45% от объема почвы. Агродеградация приводит к резкому падению водоудерживающей способности, причем самые значительные потери отмечаются в случае векового пара. Равновесный запас влаги, аналогичный состоянию наименьшей влагоемкости для 100 см слоя целинной почвы в 1,4-1,7 раза превышает таковые для вариантов агрогенной деградации. Вместе с утратой гумуса про вовлечении в интенсивное сельскохозяйственное использование, природный чернозем теряет 150-200 мм продуктивной для растений влаги, что в зоне периодического дефицита осадков может быть решающим, лимитирующим фактором. Это означает резкое падение урожайности из-за недостатка доступной влаги, а при вероятных в переживаемую эпоху глобальных климатических изменений длительных засухах – практически полную гибель возделываемых культур.

Имитационные эксперименты с моделью динамики влаги HYDRUS-1D (см. главу 2, раздел 2.2), изложенные в работе [Смагин, 2009], подтверждают полученную выше оценку. Здесь исследовался уже самый верхний (пахотный или дернинный) горизонт 20 см мощности. На рисунке 1.13 приведены модельные графики динамики запасов почвенной влаги при ее свободном гравитационном оттоке из этого слоя. Как видно на установление равновесного состояния уходит не менее 10 суток, независимо от варианта почвы. Однако по прошествии этого времени остаточный (равновесный) запас влаги в целинном черноземе существенно превышает таковую для почв пашни и вечного пара. Вариант пахотной почвы теряет 40 мм

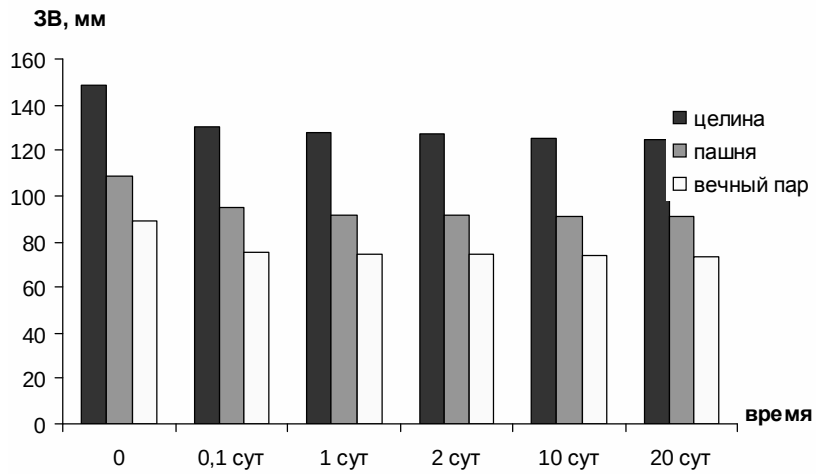


Рис. 1.13. Моделирование динамики запасов влаги в слое (0-20 см) чернозема обыкновенного при свободном гравитационном оттоке по [Смагин, 2009].

продуктивной влаги по сравнению с целиной, а вечный пар – 60мм. Это соответствует 37 и 67% от общих запасов влаги в 20см горизонте данных вариантов почв. Очевидно, что подобные потери не могут не отразиться на урожайности, если только не компенсировать их поливами, что в свою очередь означает дополнительные затраты на производство сельскохозяйственной продукции и усиление деградации использующихся черноземных почв. Таким образом, без восстановления и поддержания углеродного бюджета почв черноземная область рискует перейти в зону рискованного земледелия, и агрохимические мероприятия «интенсивных технологий» (внесение минеральных удобрений, пестицидов, стимуляторов роста…) для повышения урожайности будут безрезультатны.

Как видно ***проблема разложения*** (минерализации) гумуса и иных специфических веществ-биополимеров является кардинальной в природных и антропогенных экосистемах и именно с нею связано большинство процессов деградации почвенных ресурсов в том числе и в мегаполисе. Так на

практике городского озеленения нередко используется замена (частичная или полная) верхнего почвенного слоя более плодородным «растительным грунтом». При этом само понятие «растительный грунт» трактуется весьма разнообразно, и чаще всего под этим термином подразумеваются обогащенные органическим углеродом торфяные смеси. Давая сиюминутный положительный эффект, подобные технологии не способны привести к реальному улучшению состояния и функционирования городского почвенного покрова. Как показывают натурные наблюдения и лабораторные эксперименты по биодеструкции торфа в условиях города за 2-3 года привезенный грунт практически полностью разлагается, обнажая бесплодные нижележащие слои, непригодные для выращивания растений [Смагин, 204, Смагин и др., 2008]. На фото 3 проводится сравнение состояний московских газонов сразу после сдачи объектов озеленения и через 2-3 года деградации. Как видно, уже за этот небольшой срок основное количество торфяного субстрата успевает исчезнуть (разложиться) и на поверхность выходит бесплодный, чрезвычайно уплотненный, лишенный плодородия минеральный грунт, оставшийся после строительства. Лишь в отдельных микропонижениях можно видеть темноокрашенные пятна – остатки торфяного субстрата. Газон необратимо деградирует и на его месте начинает развиваться менее требовательная к почве природная растительность, часто из уцелевших в торфе семян сорняков. По сути дела участок начинает заново осваиваться растениями по принципу первичной сукцессии на бесплодной породе, что может растянуться на десятки лет, пока не сформируется новый гумусовый горизонт с необходимым запасом элементов минерального питания, соответствующей структурой и влагоемкостью почвы. На практике часто по прошествии 2-3 лет приходится заново формировать газон с привнесением очередной порции растительной торфосмеси, затратами на семена и организационные работы. И так снова и снова, на что из городского бюджета тратятся сотни миллионов рублей фактически впустую из-за неустойчивости применяемых почвогрунтов и самих зеленых насаждений.

К этому добавим, что деструкция торфяных смесей приводит к дополнительному выбросу в атмосферу диоксида углерода и паров воды, усугубляя локальный парниковый эффект и явление городского смога. Удельная интенсивность выделения CO_2 с единицы площади при разложении торфа (300-1000 г/м^{2}год) может на порядок превышать аналогичный показатель техногенного выброса (100 г/м^{2}год из расчета 100 тыс. т/год выхлопных газов на площади Москвы ≈100 тыс. га.). Все вместе, наряду, с высокой стоимостью операции замены грунтов в масштабах мегаполиса и риском интродукции экологически вредных материалов, указывает на нерентабельность действующих технологий и требует поиска новых, альтернативных подходов, учитывающих специфику крупных городов [Смагин и др., 2008].

При разработке альтернативных технологий почвенного конструирования важно учитывать зависимость темпов биодеструкции органогенных материалов от глубины почвы (рис. 1.14). Как показывают наши исследования [Смагин, 2005, Смагин, Смагина, 2008, Смагин и др., 2009] вертикальные распределения биогенных источников CO_2 в агрогенных, торфяных и лесных почвах носят схожий характер, а именно – быстрое (экспоненциальное) снижение интенсивности эмиссии с глубиной. Поскольку эмиссия CO_2 в объеме образца почвы отражает интенсивность минерализационных процессов (биодеструкции) в нем, можно считать, что эта универсальная закономерность характерна для распределения скоростей разложения биополимеров в почвенной толще. Подобное резкое падение биологической активности с глубиной в почвах связано со множеством причин, среди которых наиболее важными являются закономерности профильного распределения биомассы микроорганизмов, корней и легкоразлагаемых органических субстратов, а также диффузионный поток кислорода из атмосферы в почву (интенсивность газообмена), замедляющиеся с глубиной. Так согласно полученной экспоненциальной регрессии (сплошные линии на рисунке 1.14) в случае дерново-подзолистой минеральной почвы 50% источников сосредоточены в верхнем 6см почвенном слое, а 90% – в 20см. Для более развитой и обогащенной органическим веществом перегнойно-торфяной почвы аналогичные

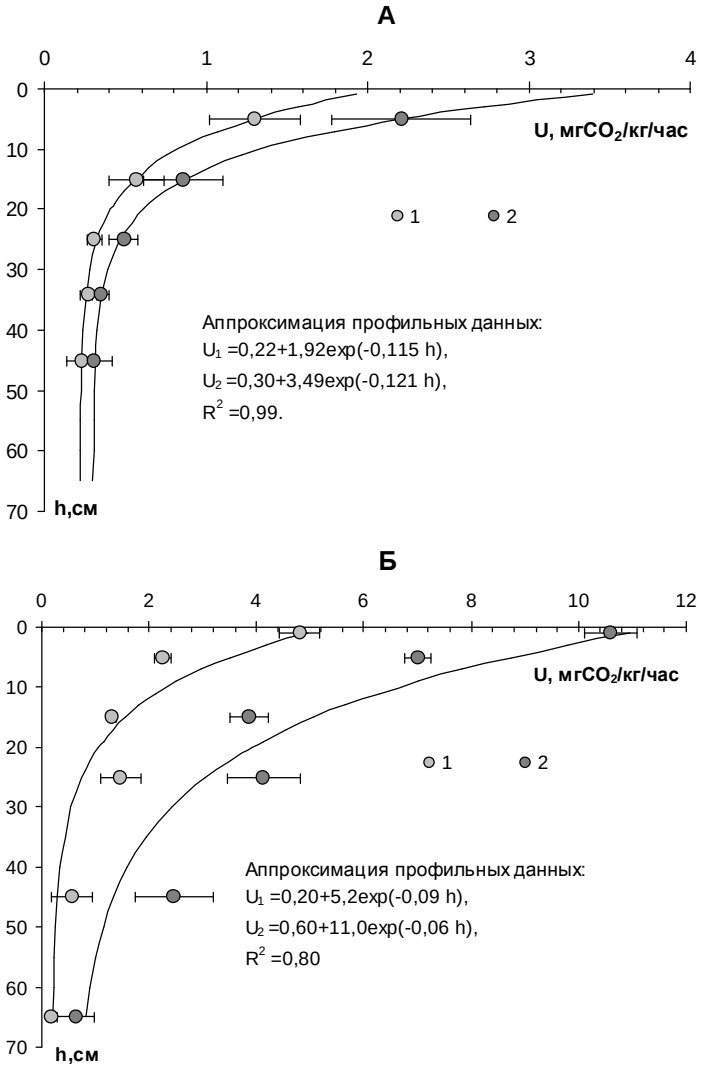


Рис. 1.14. Профильные распределения функции биогенной эмиссии CO_2 в почвах УОПЭЦ МГУ «Чашниково»: А – дерново-подзолистая легкосуглинистая почва под лесом, Б – перегнойно-торфяная низинная освоенная почва под луговой растительностью; 1 – традиционный метод инкубации, 2 – модифицированный метод с термодесорбцией CO_2.

характеристики составляют порядка 10 и 30 см, соответственно. Это означает, что заглубление органического материала на 5-10 см от поверхности гарантирует снижение темпов его биодеструкции в 1,5-2 раза с соответствующим увеличением срока службы почвомодификатора.

Данный вывод, принципиально важный для проектирования почвенных конструкций на основе природных и синтетических почвомодификаторов, подтверждается независимыми исследованиями белорусских ученых, занимавшихся в 70-80^{x} годах проблемой углеродного баланса и деградации осушаемых торфяных почв [Бамбалов, 84]. По данным, полученным в Институте торфа АН БССР перекрытые минеральными грунтами мощностью 1-10м межледниковые торфяники Белоруссии, имеющие возраст около 140 тыс. лет прекрасно сохранились, причем степень их разложения от 15 до 50% и химический состав весьма близок к современным аналогам. Это наблюдение свидетельствует о принципиальной возможности консервации органических веществ с помощью минеральных экранов. Конечно, экран метровой мощности и более нереален в производственных условиях, к тому же их данных, приводимых в монографии [Бамбалов, 84] следует, что мощность минерального слоя более 50 см поверх торфа ухудшает его агропроизводственные свойства и продуктивность. Хотя здесь идет речь о травяных культурах, а при выращивании древесной растительности, как показывает наш опыт почвенного конструирования в странах Персидского залива [Smagin et al., 2005] вполне допустимо и эффективно с практической точки зрения создавать слой торфяного почвомодификатора в посадочной яме на глубинах 0,5-1м и более, особенно для пальм.

Анализ экспериментальных данных монографии [Бамбалов, 84] показывает, что интенсивность минерализации органического вещества торфяных почв зависит от способов так называемой структурной мелиорации этих объектов с помощью минеральных грунтов, то есть в современной терминологии от способов почвенного конструирования. Варианты и схемы этих конструкций будут отдельно рассмотрены в разделе 1.4, а здесь мы приведем лишь необходимую информацию о темпах разложения торфа. На контрольных участках осушенных

торфяных почв («черная культура» в почвенно-мелиоративной терминологии) деструкция в первые годы использования варьировала от 4,3 (многолетние травы) до 6,5-12,6 т/га в год (зерновые, пропашные культуры). Даже минимальные темпы в 4 т/га/год (400 г/м^2/год), свойственные близким к городской газонной растительности многолетним травам, подтверждают возможность исчезновения за год большей части торфяного почвогрунта, поскольку в современном городском озеленении редко используются его количества больше 500-1000 г/м^2 (≈ 4-8 см растительного слоя). С учетом высокой гигроскопичности и влажности торфяных субстратов, реальные нормы по сухому веществу оказываются еще ниже.

Технологии, основанные на внесении минеральных грунтов преимущественно легкого гранулометрического состава (пескование) в дозах 200-1600 м^3/га с последующим перемешиванием с торфом, хотя и дают значительную прибавку в урожайности, часто сопровождаются ускорением разложения торфа [Бамбалов, 84, Зайдельман и др., 2001]. Слоистый же способ внесения минеральных грунтов, так называемая покровная культура, как и следует из приведенных нами ранее закономерностей профильного распределения биологической активности (рис. 1.14) снижает интенсивность биодеструкции торфяного материала. По экспериментальным данным Полесской опытной мелиоративной станции покрытие торфа слоем песка в 4 см замедляет его разложение в ≈1,6 раза, а при мощности экрана 10 см – в 2-2,5 раза, причем эффект устойчиво сохранялся на протяжении 4-летнего полевого опыта [Бамбалов, 84]. Таким образом, анализ закономерностей природной организации почв, в частности вертикального распределения их биологической активности, позволяет заключить, что при создании городских конструктоземов с использованием органических почвомодификаторов целесообразно экранировать их слоем минерального грунта от 5-10см для сплошных конструкций под травянистой растительностью (цветники, газоны) и большей мощностью в случае локальных посадок древесных и кустарниковых культур. Более детально это положение будет обосновано и использовано в последующих главах монографии.

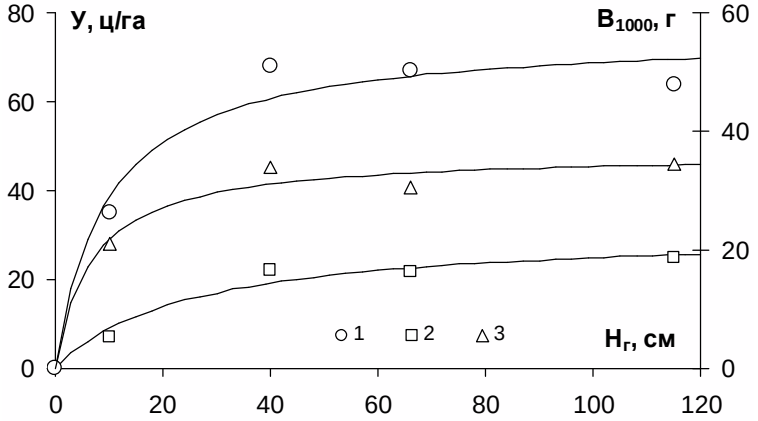


Рис. 1.15. Зависимости показателей урожайности от глубины залегания галечника по данным [Зайдельман, 2009] (Сут-Хольская степь, Тува). 1 – урожай вегетативной массы орошаемой яровой пшеницы в ц/га воздушно-сухого вещества, 2 – урожай зерна при влажности 14% в ц/га, 3 – вес 1000 зерен в граммах, символы – реальные данные, сплошные линии – модель Михаэлиса-Ментен.

Проблема определения оптимальной (необходимой и достаточной) ***мощности конструктоземов***, а также их защиты от техногенного загрязнения и засоления диктует необходимость анализа организации и функционирования природных почв с укороченным профилем. Такие почвы часто встречаются в горных условиях, а также в предгорьях, где каменистые осыпи перекрываются слоем плодородного мелкозема той или иной мощности. Рассмотрим результаты почвенно-мелиоративных и экологических исследований подобных объектов в виде черноземных и каштановых почв предгорных речных долин, подстилаемых галечником по материалам недавно изданной фундаментальной монографии-учебнике заслуженного деятеля науки РФ проф. МГУ Ф.Р. Зайдельмана [2009]. Подобного рода образования условно делятся на четыре группы по признаку глубины залегания галечника:

- скелетные почвы (галечник на глубине 0-20см);

- почвы неразвитого профиля (галечник на глубине 20-40см);
- почвы укороченного профиля (галечник на глубине 40-80см);
- почвы полного профиля (галечник на глубине более 80см).

На рисунке 1.15 приводятся обработанные нами данные по показателям урожайности на почвах указанных категорий, из которых следует, что в условиях орошаемого земледелия мощности мелкозема порядка 40-50 см вполне достаточно для получения устойчивых урожаев не уступающих, а иногда и превышающих таковые на почвах полного профиля. Зависимость урожайности (У) от мощности мелкозема или глубины его подстилания грубодисперсным галечниковым экраном ($H_г$) достоверно (R^2≈0,96-0,98) аппроксимируется известным в биологии уравнением Михаэлиса-Ментен вида $У=aH_г/(b+H_г)$, где a,b – эмпирические константы. Согласно этой модели, обычно применяемой для описания роста организмов в зависимости от потребляемого ими субстрата, в условиях дефицита эдафического ресурса ($H_г<<b$) урожайность нарастает пропорционально мощности почвенной толщи. Однако это увеличение не бесконечно и при достаточной для растений мощности почвенной толщи ($H_г$~b) этот показатель перестает быть определяющим. Его дальнейший рост практически не сказывается на состоянии растений (кривая урожайности выходит на плато).

Интересен тот факт, что корневые системы травянистых растений (злаково-полынных естественных ассоциаций, люцерны, яровой пшеницы) на почвах скелетных, с неразвитым и укороченным профилями осваивают не только верхнюю мелкоземистую толщу, но и имеют второй максимум концентрации корней (до 30% по массе) в слое на границе мелкозема с грубодисперсным галечником [Зайдельман, 2009]. Автор, ссылаясь на классические опыты А.Ф. Лебедева [1936], совершенно справедливо указывает на основную причину этого явления – удержание дополнительного количества влаги при разрыве капиллярной связи на границе контрастных по дисперсности слоев почвогрунта. Феномен подвешивания влаги при внедрении в почву на определенную глубину грубодисперсного экрана (эффект «антидренажа») получил

теоретическое обоснование в наших работах [Смагин, 2003, Смагин и др., 2008] и используется как один из технологических приемов почвенного конструирования. Кстати, некоторое падение продуктивности при превышении глубины подстилания галечника 40-50 см (рис. 1.15) в особенности для супесчаных и легкосуглинистых почв может объясняться следующим. Увеличения гидростатического давления от 40-50 до 60-70 см водного столба становится достаточным, чтобы преодолеть капиллярные силы и сбросить подвешенную воду из вышележащей толщи мелкозема в каменистый экран, приобретающий при этом функции дренажного коллектора. Поэтому при проектировании слоистых конструктоземов с грубодисперсными (щебнистыми, галечниковыми) экранами чрезвычайно важно рассчитывать глубину их расположения, ведь иногда различий в 10-15 см вполне достаточно, чтобы вместо накопления влаги и растворенных питательных веществ в верхней толще, осуществлялся их гравитационный отток в подстилающий экран [Смагин, 2006, Смагин и др., 2008].

Из почвенно-мелиоративных мероприятий на почвах неразвитого профиля рекомендуется проведение весенних предпосевных влагозарядковых поливов [Зайдельман, 2009]. Действительно, промачивание почвенной толщи мелкозема на всю ее глубину порядка 40-50 см позволит в зависимости от гранулометрического состава (влагоемкости) создать запас подвешенной влаги порядка 100-180 мм (100-180 л/м^2), что достаточно для формирования и поддержания роста фитомассы трав до 20 ц/га в течение как минимум месяца без дополнительного водоснабжения. В гумидных условиях аналогом подобных влагозарядковых поливов станет поступление в почву талых вод и весенних дождевых осадков.

Каменистые экраны защищают верхний корнеобитаемый слой почвы от засоления, и подобные почвы, как в естественных условиях, так и при вовлечении в орошаемое земледелие не бывают засолены. Аналогичную функцию может выполнять экран в виде промороженной толщи (вечная мерзлота), также нарушающий капиллярную связность в профиле и прекращающий восходящее движение засоленных почвенных растворов к поверхности (корнеобитаемой зоне) [Зайдельман, 2009].

Слоистые почвы и грунты, распространенные в долинах рек, осушенных озер (термокарстовые аласы), в зонах периодических извержений и выпадения пепла (вулканические почвы), пыльных и песчаных бурь (погребенные почвы), чаще всего характеризуются повышенной водоудерживающей и поглотительной способностью, большим запасом питательных элементов по сравнению с гомогенными аналогами, что способствует большей продуктивности развивающейся на них природной и сельскохозяйственной растительности [Гаель, Смирнова, 99, Карпачевский и др., 2009, Зайдельман, 2009]. По генезису они, конечно, отличаются от почв, в которых слоистость, текстурная дифференциация, новые функциональные горизонты возникают в процессе самого почвообразования под воздействием биогенной организации на протяжении достаточно длительного времени. Экзогенные (внешние) факторы водного, водно-ледникового, эолового генезиса приводят чаще всего к прерыванию текущего почвообразовательного процесса, погребению тех или иных почвенных горизонтов, созданных ранее и формированию новых при освоении биоценозом свежих минеральных субстратов, поступивших на дневную поверхность. Вместе с тем и экзогенные и эндогенные и переходные между ними (смешанные) формы профильной дифференциации веществ с четкими границами между отдельными слоями (горизонтами) в большинстве случаев характеризуются общим свойством повышенного биоресурсного потенциала, что следует иметь в виду при создании искусственных аналогов подобных почв в виде конструктоземов. Структурные элементы почвы (генетические горизонты, слои) в природных условиях нередко отвечают за ту или иную функцию (депонирование биофильных веществ и влаги, дренаж, изоляцию вредных веществ и шлаков и т.д.). Тем самым в почве проявляются общие закономерности природной структурно-функциональной организации, приводящие к образованию сложной системы биогеогоризонтов на уровне фитоценоза и экосистемы в целом.

Итак, мы рассмотрели вкратце закономерности природной организации почв как динамических биокосных систем в контексте проблемы искусственного создания конструктоземов. В следующем разделе будет дана характеристика ***материалов***,

использующихся на практике почвенно-ландшафтного конструирования.

1.3. Природные и синтетические материалы для улучшения качества и конструирования почв.

Направление по оптимизации свойств почв биополимерными материалами зародилось в конце 19 начале 20 веков в опытных работах российских и зарубежных почвоведов, изучавших воздействие органических коллоидов на минеральные компоненты почв и грунтов. В экспериментах А.А Фадеева и В.Р. Вильямса аммиачная гумусовая вытяжка из чернозема была применена для агрегирования смеси кварцевого «воробьевского» песка и «гжельской» глины. Сходные опыты проводили Свен-Оден и Н.И. Саввинов, используя с этой целью щелочную вытяжку из торфа [Качинский, 62]. В 30-40^{x} годах прошлого столетия обширные исследования в области искусственного оструктуривания были предприняты в нашей стране в Агрофизическом институте под руководством академика А.Ф. Иоффе и ведущих специалистов – П.В.Вершинина, Д.И Талмуда, Ф.Е. Колясева и других. Синхронно аналогичные работы проводились в США, Германии и Великобритании на Ротамстедской опытной станции. В качестве препаратов-структоров использовались гумусовые вытяжки из черноземов, битумы, торфяной клей, смоляной клей, силикат натрия, лигносульфонаты, кремнийорганические соединения, стеариновые и альгиновые кислоты [Вершинин, Константинова, 35, Качинский, 62]. Однако для получения эффективных результатов требовалось вносить значительные дозы препаратов (1% и более от массы почвы), что на фоне небольших и неустойчивых прибавок урожая и кратковременности действия не позволило использовать их в сельском хозяйстве.

Заметим, что на наш взгляд мотивация отказа от использования этих, да и многих других почвенных кондиционеров низкой продуктивностью растений не всегда оправдана. Помимо повышения урожайности, в задачу устойчивого земледелия входит поддержка структуры и

плодородия почвы на заданном уровне, на что также необходимо затрачивать немало сил и средств, преследуя целью не сиюминутную выгоду, а заботу о состоянии почвы. В последующем исследователи неоднократно возвращались к вопросам использования природных органических полимеров, их химических модификаций, а также отходов нефтепереработки и целлюлозобумажной промышленности, например, при закреплении песков битумными, асфальтовыми, и латексно-масляными эмульсиями, смоляными адгезивами, нефтепродуктами [Захаров, 54, Иванов, 67, Ревут и др., 69, 73 Афлятинов, 70, Михайлина, 73, John, 65, Кульман, 82]. Множество органических веществ оказалось пригодным для мульчирования поверхности почв с целью оптимизации ее теплового и водно-воздушного режимов [Кульман, 82]. С вовлечением в сельское хозяйство органогенных торфяных почв в передовых европейских странах стали использовать альтернативные технологии в виде мульчирования минеральными материалами – пескования, покровной, римпауской культуры и других комбинаций торфа с песком, направленных на сохранение плодородия осушенных земель [Бамбалов, 84, Зайдельман и др., 2005].

Химизация сельского хозяйства, погоня за урожаем на некоторое время снизили интерес к традиционным технологиям окультуривания почв с обязательным применением ***органических удобрений*** – навоза, пожнивных остатков, сидератов, компостов, торфа, сапропеля, вермикультур. В результате многие, ранее плодородные почвы сильно деградировали, снизили свою продуктивность, подверглись вторичному засолению, дегумификации и потере структуры, а получаемая «химическим» путем сельскохозяйственная продукция утратила былые вкусовые качества, устойчивость при хранении и стала не безопасна для здоровья.

Приходится констатировать, что создаваемое веками плодородие почвенного покрова планеты теряется катастрофическими темпами [Ковда, 85]. Антропогенная деградация пахотных почв с отрицательным балансом гумуса привела к тому, что многие черноземы со времени их исследования В.В.Докучаевым потеряли 30% и более органического вещества от исходных запасов в целинных

землях (см. выше §1.2). В работе [Возможности современных…, 2000] ведущие иностранные специалисты констатируют, что сельскохозяйственное использование почв в странах умеренного климата за последние 50 лет привело к потерям органического вещества до 20-40% от исходного содержания, причем основной фактор потерь не эрозия почв, а минерализация почвенного углерода с выделением CO_2 в атмосферу. Еще более высокими темпами (до 10-12 т/га·год) идет сработка торфяных залежей при осушении и введении в сельскохозяйственное использование заболоченных земель [Ефимов, 80, Зайдельман и др., 2005, Bridges, Batjes, 96].

Снижение концентрации ОВ в почвах приводит к существенному ухудшению структурного состояния, водоудерживающей и поглотительной способности почв, выносу элементов минерального питания и как следствие – снижению почвенного плодородия [Гедройц, 55, Вершинин, 59, Хан, 69, Бондарев, 94, Бондарев, Кузнецова, 87, Растворова и др., 89, Кузнецова, 94, Сапожников, 94, Сапожников и др., 92, Онищенко, 96, Смагин, 93, Смагин и др., 99, 2003, 2004, Шеин, Милановский, 2003]. В связи с этим в последние годы во всем мире наметилась тенденция возвращения к старым технологиям с использованием природных органических веществ-удобрений и их модификациям в виде систем органического земледелия «organic farming» [Безуглова, 2002]. Однако, здесь следует помнить, что формирование культурных почв с использованием органических удобрений – трудоемкий, длительный и в общем то перманентный процесс, прекращение которого неминуемо означает старт деградации. По данным [Бондарев, 94] подавляющее большинство пахотных почв России деградирует, имея отрицательный гумусовый бюджет, на пополнение которого требуется вносить не менее 20 т/га обычных органических удобрений. По-видимому, параллельно с традиционными подходами в окультуривании и ремедиации почв следует развивать альтернативные технологии с использованием обогащенных естественных биополимеров (биогумус, компостные почвомодификаторы, вермикультуры) и синтетических препаратов, применение которых могло бы осуществляться в значительно меньших дозах [Безуглова, 2002, Смагин и др., 2008, Смагин, 2009]. Рассмотрим подробнее

наиболее часто применяемые на практике природные и модифицированные органические материалы для улучшения качества почв и плодородия, следуя нашему обзору на международном симпозиуме по российско-арабскому проекту Arid Grow в 2007 в Бахрейне [Materials…, 2007], работе [Безуглова, 2002] и Интернет-источникам.

Среди мировых держав Россия располагает наиболее мощными ресурсами ***каустобиолитов*** – сырья потенциально пригодного для промышленного производства органических удобрений и почвомодификаторов. Каустобиолиты – горючие полезные ископаемые органического происхождения (торф, ископаемый уголь, как каменный, так и бурый, горючие сланцы, сапропель и т.д.). В последние десятилетия активизировалось производство и экспорт органических веществ, продуцируемых промышленным способом на основе каустобиолитов, и находящих широкое применение в земледельческой практике для коренного улучшения плодородия почв. Приведем некоторые наиболее эффективные материалы для аридного поливного земледелия на почвах легкого гранулометрического состава.

Торф и торфяные компосты. Все торфа делят на верховые, низинные и переходные. Кроме того, по содержанию гумифицированных веществ торф разделяют на слаборазложившийся – 5 – 25%, среднеразложившийся – 25 – 40%, сильно разложившийся – более 40%. В чистом виде для удобрения используют торф низинный. Перед внесением в почву его хорошо измельчают и не менее полугода «выветривают» в кучах. В целом использование торфа на удобрение в чистом виде неэффективно, а иногда и вредно. Сухой торф обладает высокой поглотительной способностью и при внесении в почву поглощает из почвенного слоя влагу, столь необходимую растениям. Поэтому вносить в почву торф с влажностью менее 35% не рекомендуется, за исключением отдельных случаев (например, гидрофобные почвенные конструкции). В современных технологиях городского озеленения низинный торф и торфопесчаные смеси активно используются для создания верхнего так называемого «растительного» слоя при посадке травянистых культур (газоны, цветники). При этом часто торф с семенами газонных трав

рассыпается небольшим слоем 2-5см на поверхности бывшей почвы или грунта, оставшегося после строительства. Технология при должном увлажнении (полив, естественные осадки) обеспечивает быстрое прорастание семян и укоренение трав, с образованием сплошного газона за 3-4 недели, что в свою очередь гарантирует сдачу объекта озеленения. Однако, по прошествии 1-2 сезонов такой газон неизбежно деградирует по мере деструкции торфа и заменяется сорной растительностью, а на обнажившихся слоях минерального грунта начинается процесс первичной сукцессии с постепенным почвообразованием и соответствующими сменами видов растений, если только не производится «ремонт газона» с новым внесением торфа и посадкой семян газонных трав (см предыдущий раздел).

На подстилку животным идет торф верховых болот, используют и другие торфа, но только в том случае, если степень разложения органического вещества не превышает 20%. Все остальные виды торфа используют для приготовления торфонавозных, торфофекальных, торфофосфоритных, торфозольных и других ***компостов.*** Торф богат азотом, но содержится он в нем в виде органических соединений, которые становятся доступными растениям только после их минерализации. Мало в торфе фосфора и очень мало – калия. В ходе приготовления компостов учитывают эти свойства торфа. Компостирование торфа с биологически активными веществами типа навоза, навозной жижи и т.д. преследует цель повысить доступность азота торфа для растений и обогатить его фосфором и калием.

Торфонавозный компост состоит из торфа и навоза: на 1—2 части торфа берется 1 часть навоза. Часто, чтобы повысить в удобрении содержание фосфора, в такой компост добавляют фосфоритную муку из расчета 2—3% от массы компоста. Иногда добавляют и калийную соль в количестве 0,5% от массы компоста. Минеральные удобрения в компосте должны быть тщательно перемешаны с органической массой. При компостировании кислого торфа вносят известь или золу. В зависимости от кислотности торфа к 100 кг торфокрошки добавляют от 1 до 3 кг извести или золы. Известь нейтрализуют повышенную кислотность, и создает благоприятные условия для

деятельности микрофлоры, а, следовательно, и разложения торфа.

Российские ученые создали ряд препаратов которые значительно ускоряют разложение органических отходов при компостировании. В состав таких препаратов (например, «Тамир» (Уфа)) входят специально подобранные ферменты и микроорганизмы. Ферменты расщепляют органические отходы на более простые составляющие, а микроорганизмы используют их в качестве своей пищи и, когда она заканчивается, отмирают. Зарубежный аналог называется EM Waste Treatment и используется более чем в 80 странах. В животноводстве его применяют для обработки отходов, устранения специфических неприятных запахов и получения высококачественного ферментированного удобрения «ЕМ-навоз». Биоферментные препараты выпускает и южноафриканская фирма «Sannitree» из Кейптауна. Эти препараты достаточно просты в обращении и совершенно безвредны для человека и окружающей среды.

Навоз – самое распространенное из органических удобрений и при условии правильного его приготовления и использования, это, пожалуй, наилучшее из местных удобрений. Наиболее ценен по своим качествам конский и овечий навоз, затем следует навоз крупного рогатого скота. Содержание элементов питания в овечьем навозе, например, в 1,5 -2 раза выше, чем в навозе крупного рогатого скота. Конский и овечий, так называемый «горячий» навоз содержит воды меньше, поэтому разлагается быстрее, и его рекомендуют использовать в первую очередь для компостирования при производстве органических почвенных удобрений и кондиционеров. Хорошим материалом для подстилки при получении навоза является торф верховых болот: 1 т торфа, использованного в качестве подстилки, может дать 5 – 7 тонн хорошего навоза.

Птичий помет по своим удобрительным качествам превосходит навоз, а по быстроте действия не уступает минеральным удобрениям. Качество его зависит от способа содержания и кормления птицы, вида кормов, но самое главное – вида, породы и возраста птицы. Наилучшими удобрительными свойствами обладает куриный помет, по содержанию элементов питания не уступает ему и помет голубей, индеек. В помете

содержатся и так необходимые растениям микроэлементы: марганец, цинк, кобальт, медь, железо. Кроме того помет, как и навоз, содержит биологически активные вещества, стимулирующие деятельность почвенной микрофлоры. Однако птичий помет быстро теряет свои ценные вещества, особенно азот. За 1,5 – 2 месяца хранения в кучах из помета в буквальном смысле этого слова улетучивается более половины азота. Эти потери можно предотвратить, если свежий помет компостировать или быстро высушить в специальных барабанных сушильных установках. Этот метод термического обезвоживания очень привлекателен, так как сушка помета не только помогает избежать потерь элементов питания, но и, что очень важно, в ходе ее происходит обеззараживание от нежелательной микрофлоры (возбудителей болезней) и яиц гельминтов, теряется всхожесть семян сорных растений. При этом из 300 кг сырого помета получается примерно 100 кг концентрированного органического удобрения, в котором при влажности 20% содержится около 4,5 кг азота, 3,7 кг фосфора, 1,8 кг калия, 4,5 кг кальция, 1,6 кг магния и другие элементы питания.

В г.Москве в последнее десятилетие активно рекламировался ряд продуктов под торговой маркой «ПИКСА», в основе которых лежит оригинальная технология производства органоминеральных компостов и обогащенных органикой почвогрунтов с использованием птичьего помета. Однако повышенное содержание в них ряда химических элементов (прежде всего фосфора), свойственное птичьему помету не удовлетворяло действующим нормативам качества почв добровольной системы сертификации «Экологичные почвогрунты», откуда возникли попытки лоббирования интересов этих производителей через департаменты ЖКХ и ДПиООС г. Москвы с целью повышения допустимых норм содержания элементов в почвогрунтах. Эксперты факультета почвоведения МГУ, включая автора настоящих строк, неоднократно предупреждали городские власти и общественность о вреде подобных законодательных изменений, и самовольных смещениях экологических нормативов на поводу заинтересованных коммерческих структур. В результате в новой редакции постановления Правительства Москвы «Правила

создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы» от 11.05.2010 № 386-ПП, были учтены эти замечания, и критерии качества почвогрунтов, использующихся для озеленения, в части содержания биофильных макроэлементов были приведены в соответствие с научно-обоснованными агрохимическими нормами.

При приготовлении торфопометных компостов рекомендуют добавлять фосфорные удобрения, например, фосфоритную муку (2—3 кг на 100 кг компоста) или суперфосфат порошковидный (1—2 кг на то же количество компоста). Некоторые авторы рекомендуют доводить долю фосфорных удобрений в компосте до 5—7% по массе, что соответствует 5—7 кг на 100 кг компоста. Фосфорные удобрения повышают удобрительную ценность не только тем, что компост обогащается фосфором. При этом значительно снижаются потери азота, так как выделяющийся аммиак связывается химическим путем с серой, содержащейся в этих удобрениях, в сульфат аммония. Достаточно перспективным ингредиентом органоминеральных компостов является фосфогипс, не только состав (фосфор, сера), но и подкисляющее действие которого, наряду с асептическими свойствами (мацерация тканей и яиц гельминтов) обусловливают хорошее качество компостной продукции [Белюченко и др., 2010]. Вместе с тем, как уже отмечалось выше, использование фосфорных удобрений, фосфогипса и иных минеральных добавок при компостировании и производстве растительных смесей должно строго регламентироваться во избежание получения на выходе не кондиционных почвогрунтов, перегруженных евтрофицирующими биофильными элементами и (или) загрязняющими окружающую среду веществами.

Многочисленные современные технологии ферментирования и компостирования органических отходов позволяют готовить высококачественную продукцию в сжатые сроки порядка нескольких недель даже в неблагоприятных биоклиматических условиях. При этом вместо традиционных способов размещения материалов для компостирования на открытом воздухе в виде буртов, компостных куч или ям, используются специальные агрегаты (ферментационные аппараты) с механическим перемешиванием, подачей воды и

воздуха (аэрацией), внедрением специальных штаммов микроорганизмов и т.д. Особый интерес в этой связи представляют технологии ***вермикомпостирования*** с использованием сепарационной техники и специальных культур червей, адаптированных к тем или иным видам органических отходов. По нашим данным копролиты дождевых червей не только обогащаются биофильными элементами, но и в значительной мере (в 1,5-2 раза и более) повышают водоудерживающую способность вмещающего материала почвогрунтов благодаря смешиванию и оструктуриванию минеральных и органических компонентов [Смагин, Прусак, 2008]. Устойчивые к углеводородному загрязнению популяции дождевых червей при определенных гидротермических условиях способны к эффективной ремедиации почв, что положено в основу оригинальной биотехнологии вермикомпостирования нефтезагрязненных почвенных субстратов с органическими добавками [Смольникова, 2010].

Еще более ценными почвомодификаторами по сравнению с торфонавозными и обогащенными торфяными компостами являются разнообразные ***гуминовые удобрения*** (почвомодификаторы) и ***препараты***, получаемые на основе механической, химической и биохимической обработок каустобиолитного сырья. Они оказывают многостороннее положительное влияние на свойства почвы, так как улучшаются ее физико-химические и биологические характеристики. По сравнению с обычными органическими удобрениями имеется и еще одно важное преимущество – отсутствие семян сорных растений. Благодаря наличию биологически активных веществ эти препараты и удобрения оказывает стимулирующее действие и на растение. Ускоряется прорастание семян, улучшается приживаемость рассады, повышается устойчивость к заболеваниям, все это способствует не только увеличению урожайности, но и получению более ранней и более качественной продукции. Озимая пшеница и сахарная свекла дают прибавку урожая до 20%, кукуруза – 30-50%, картофель – до 40%, фрукты и овощи – до 35%. Повышается и качество продукции; так огурцы, выращенные на малообъемных субстратах, в состав которых вводили гумусовые препараты, повышали урожайность на 10-15%, причем по сравнению с

контролем (NPK) в 2 раза снижалось содержание нитратов в продукции. Аналогичные сведения существуют и о связывании гуминовыми препаратами тяжелых металлов, что блокирует их поступление в растения и снижает концентрацию загрязняющих веществ в фитомассе.

Гуминовые удобрения и препараты получают из природного сырья: торфа, бурого угля, сапропеля. Происхождение и свойства этих веществ существенно разнятся, но их объединяет наличие в составе гуминовых веществ. Гуминовые вещества – особая группа органических соединений, происхождение которых связано с процессами биохимического разложения и преобразования растительного опада (листья, корни, ветки, стволы), останков животных, белковых тел микроорганизмов. В современный исторический период они образуются естественным путем и накапливаются в почвах. В их состав входят ***гуминовые кислоты***, фульвокислоты, соли этих кислот – гуматы и фульваты, а также гумины – прочные соединения гуминовых кислот и фульвокислот с почвенными минералами. Климатические условия на Земле прошлых геологических эпох, способствовали накоплению гуминовых веществ в осадках и образованию каустобиолитов. Причем в каустобиолитах гуминовые вещества сохранились преимущественно в виде гуминовых кислот.

Однако гуминовые вещества, содержащиеся в этих полезных ископаемых, переходят в физиологически активное состояние и эффективно действуют как стимуляторы роста растений и источники элементов питания лишь после ***активации***. Активаторами могут быть повышенные температуры, навоз, птичий помет, минеральные соединения, например аммиачная вода или другие щелочи. Препараты чаще всего представляют собой очищенные от примесей гуминовые кислоты или соли гуминовых кислот, например гумат натрия. В настоящее время удается получать практически полностью водорастворимые препараты, использующиеся в поливном земледелии в низких концентрациях (разведение до 1:1000). Это так называемые ***жидкие мелиоранты***. Их используют в качестве стимуляторов роста для опрыскивания семян (повышается всхожесть и урожайность), посевов, замачивания клубней и черенков (улучшается и ускоряется укоренение).

Удобрения (***твердофазные почвомодификаторы***) по сути своей также являются соединениями гумусовых кислот. Но при получении удобрений не производят отделения от субстрата и очистки от примесей гуминовых соединений. В составе гуминовых удобрений элементы питания присутствуют в виде органических соединений и становятся доступными для растений после их трансформации в минеральные формы. Количество их определяется составом того каустобиолита, из которого получено удобрение, а также способом активизации. Так, торф содержит от 0,8 до 3,3% азота, 0,06 - 0,5% фосфора, 0,1-0,15% калия. Бурый уголь содержит 1,2% азота, его обработка в целях активизации гуминовых веществ, например, аммиачной водой одновременно повышает содержание азота в удобрении до 4,0%. Гуминовые удобрения содержат высокое количество углерода гуминовых веществ. В удобрениях, полученных из бурого угля, содержание углерода составляет от 50 до 60%, что существенно изменяет баланс органического вещества в почвах, при условии внесения, например, бурого угля в мелиоративных дозах.

Исследованиями многих ученых установлено, что гуминовые вещества, внесенные с удобрениями этого типа, прежде всего, изменяют физические свойства почв. Так при внесении углегуминовых удобрений повышается капиллярная и полевая влагоемкость легких почв (в среднем на 20-30%) и водопроницаемость тяжелых, улучшается структура и ее водопрочность, уменьшается плотность почвы. Отмечалось, что низкие дозы углегуминовых удобрений способствуют повышению водопрочности агрегатов, а высокие – изменяют соотношение структурных отдельностей в пользу агрономически ценных фракций. Это, в свою очередь, сопровождается изменениями в гумусном состоянии, и в биологических характеристиках почвы. Исходя из этого, еще в 1968 году в России был предложен метод получения искусственных структурообразователей на основе гуминовых кислот.

Усиление микробиологической активности наблюдается как в первый год внесения удобрений, так и в последействии. При этом максимальная общая численность микроорганизмов установлена в начальные фазы развития растения и особенно

при использовании твердых форм углегуматов. Наибольшее действие удобрения оказывают на группы азотфиксаторов, аммонификаторов и нитрификаторов, целлюлозоразлагающие и маслянокислые бактерии. Одновременно с увеличением численности микроорганизмов усиливается и ферментативная активность почвы, что, в свою очередь, увеличивает подвижность питательных элементов почвы.

Таким образом, применение гуминовых удобрений существенно изменяет условия почвенного питания растений, вызывая активное усиление процессов мобилизации питательных веществ в усвояемой для растений форме. Почвы, где вносились гуматы, характеризуются лучшими условиями азотного и фосфатного режимов при накоплении в них гумусовых соединений за счет новообразования гуминовых кислот. При этом: усиливается подвижность фосфора почвы; усиливаются процессы нитратообразования в почве, что способствует значительному увеличению общего и белкового азота и преобладанию содержания нитратов над аммиачным азотом на фоне роста нитрификационной способности и увеличения выделения углекислоты почвой. Возрастает также фотохимическая фиксация азота и доступность растениям органического азота почвы; ускоряется поступление аммиачных и амидных форм азота, фосфора в растение, в результате наблюдается увеличение содержания азота и фосфора в растении и их вынос; увеличивается концентрация железа, кальция, алюминия при снижении количества магния, т.е. гуматы оказывают существенное влияние на содержание и динамику почвенных катионов, кроме калия. Еще одной особенностью этих удобрений является снижение или полное устранение отрицательного воздействия неблагоприятных для развития растений факторов.

Гуминовые удобрения эффективнее при неблагоприятных для развития растений погодных условиях, больший эффект удобрений наблюдается при отклонении хотя бы одного из факторов роста и развития растений от оптимального. Наконец, имеются данные, что гуминовые удобрения проявляют защитные свойства: радиозащита, защита от фитотоксичного действия гербицидов, адсорбционные свойства по отношению к вредным примесям и пестицидам в почве. Таким образом,

действие гуминовых удобрений на почвенное плодородие и урожайность сельскохозяйственных культур можно представить в виде комплекса взаимосвязанных процессов: влияние удобрений на физико-химические и физические свойства почвы; непосредственное воздействие удобрений на жизнедеятельность высших растений и микроорганизмов; усиление процессов внутрипочвенного обмена: адсорбция удобрениями элементов питания почвы с улучшением питательного режима развития растений и усилением биологической активности. Конечным результатом этого взаимодействия является повышение плодородия почвы и увеличение урожайности сельскохозяйственных культур.

Необходимо заметить, что на разных почвах эффективность гуминовых удобрений неодинакова. Эффективнее внесение удобрений на слабогумусированных низкоплодородных почвах легкого гранулометрического состава, а также на выпаханных и обесструктуренных длительным орошением, так как они способствуют оптимизации свойств почвы.

В основе получения гуминовых удобрений и препаратов лежит свойство гуминовых кислот каустобиолитов образовывать водорастворимые соли с натрием, калием, аммонием. Наиболее распространенным методом получения гуминовых удобрений и препаратов является «выщелачивание» гуминовых веществ из ископаемого сырья. С использованием этого метода их производство развивается в двух направлениях – получение балластных (твердофазных) и безбалластных (водорастворимых, жидких) удобрений. Именно безбалластные гуматы чаще называют препаратами или стимуляторами роста, а балластные гуматы – удобрениями, что обусловлено различными способами их применения и дозировками. В процессе производства балластных гуматов гуминовые вещества не отделяют от всей угольной или торфяной массы. Их применяют в довольно высоких дозах, сопоставимых с общепринятыми дозами традиционных органических удобрений (обычные дозы 0,25 - 5 т/га, но могут быть и выше). Причем, производство этих удобрений в ряде случаев предусматривает обогащение их элементами питания (азотом, фосфором, калием, микроэлементами) в ходе обработок химическими реагентами.

Использование гуминовых веществ в виде препаратов обычно не сопровождается каким-либо существенным влиянием на почвенное плодородие в смысле изменения химических и физических характеристик почвы, так как концентрация гуминовых препаратов чрезвычайно низка, а применение их часто ограничивается предпосевной обработкой семян, или внекорневыми подкормками растений. Балластные гуминовые удобрения сочетают в себе некоторые свойства традиционных органических удобрений и классических гуминовых препаратов. Как и последние, гуминовые балластные удобрения обладают значительной физиологической активностью, но одновременно они оказывают заметное рекультивирующее влияние на почву: улучшают структурное состояние, водно-физические свойства, способствуют росту нитрификационной способности и увеличению подвижности фосфорных соединений.

Одной из первых была разработана схема получения и способы применения органо-минеральных гуминовых удобрений типа гумофоски в Днепропетровском СХИ. Сырьем для получения удобрений служили бурый уголь, торф и др. Различные модификации и модернизации этой схемы позволили получить достаточно представительный ряд гуминовых удобрений. В России производят торфяные удобрения с аммиаком: ТМАУ-1, ТМАУ-2, ТАУ-1, ТАУ-2, ТМАУ-4К, ТМАУ-6К, ТМАУ-3. Эта группа удобрений, разработанных сотрудниками ВНИИТП, характеризуется высокой экономической эффективностью и рекомендуется к применению под овощные культуры. Прибавки, которые получены при их использовании следующие. Картофель – 71 ц с га, капуста – 225, корнеплоды –180, кукуруза –152 ц с га. Лабораторией растениеводства ВНИИТП разработано и жидкое комплексное удобрение «Тюльпан», хорошо зарекомендовавшее себя в тепличных условиях, сырье – торф со степенью разложения не менее 20%.

Органоминеральные удобрения на основе торфа под названием КГУ (комплексное гуминовое удобрение), выпускают опытно-промышленные цеха в Белоруссии по технологии, разработанной Институтом проблем использования природных ресурсов и экологии Белоруссии. Александрийский завод горного воска (Украина) выпускает гумат натрия балластный,

представляющий собой продукт обработки бурого угля раствором каустической соды. Содержит до 50% растворимых в воде гуматов натрия. Его применяют в растениеводстве в качестве удобрения. Кроме того, предварительно освобожденный от балласта, применяется в виде растворов (50 - 100 мг/л) для предпосевной обработки семян (5-7 л 2,5 %-го раствора на 1 т зерна). Органоминеральное гуминовое удобрение «Гуммофос» приготовлено на основе торфа Замглайского месторождения по рекомендациям, разработанным Проблемной лабораторией по гуминовым удобрениям Днепропетровского СХИ. Имеет следующую характеристику: влага – 50 %, pH - 8,8; состав сухого вещества, %: ГК – 30, P_2O_5 – 1,03. Применяется как стимулятор роста и удобрение – источник элементов минерального питания. Сельскохозяйственный кооператив «Флора» в г. Днепропетровске выпускает органоминеральное гуминовое удобрение «Florex». Разработаны три формы: Florex-bio, Florex-N, Florex-PK.

Гуминовые удобрения производят не только в России, но и за рубежом. Например, в Австралии выдан патент на сложное гуминовое удобрение, содержащее в своем составе полностью и не полностью гумифицированное органическое вещество, микроорганизмы, макроэлементы (азот, фосфор, калий, кальций, магний) и микроэлементы (цинк, марганец, кобальт, бор, молибден). Американская компания American Colloid Company производит азотное удобрение с биостимулятором из ГК: «Organo-gro». Итальянская фирма «Виньета Минерариа» производит гумат калия под названием «Умекс».

Все перечисленные выше удобрения получены путем обработки каустобиолитов химическими реагентами. Между тем, активация гуминовых кислот, например, бурого угля, возможна и в результате биологического воздействия. В качестве такого воздействия могут применяться различные биологически активные вещества или отходы их производства, стимулирующие вспышку биологической активности в почве. В этом случае необязательно проводить обработку сырья в заводских условиях препаратами, содержащими биологически активные вещества. Возможно использование в таких целях и чистых культур микроорганизмов или ферментов. Вероятно,

биологические приемы воздействия являются наиболее перспективными в силу их экологической чистоты и относительной простоты, а следовательно и дешевизны.

ВНИИ ТП и НИИГ разработали новое торфо-гуминовое органо-минеральное удобрение, которое под торговой маркой «Тогум» выпускается московской фирмой «Флора-Балт» в упаковках от 50 г до 5 кг. В состав удобрения входят: 85% – органика, а также основные элементы питания растений (азот, фосфор, калий, микроэлементы) и биологически активные вещества в виде гумата калия. Этим удобрением можно заправлять грунт, почву, любой субстрат для выращивания рассады. Хорошо подкармливать растения. Тогум не слеживается, не пылит, элементы питания долгое время не вымываются грунтовой, ливневой, поливочной водой, что обеспечивает пролонгированность действия удобрения. Тогум представляет собой цилиндрические темно-коричневые или черные гранулы диаметром 3 - 5 мм и длиной – 4 - 10 мм. Гранулы легки и прочны, хорошо поглощают воду, благодаря чему тогум смягчает воздействие засухи, отдавая излишек воды в почву. Если же почва, наоборот, насыщена влагой, гранулы впитывают избыточную влагу. При разложении органики - основы удобрения – выделяется тепло и происходит саморазогрев, благодаря этому тогум поддерживает положительную температуру, что очень важно во время заморозков.

Основное преимущество тогума – медленное вымывание элементов питания грунтовой, поливной водой, атмосферными осадками, что обеспечивает постепенное поступление их в почву и продолжительное действие. Одноразового внесения тогума хватает на весь вегетационный сезон, а эффект от внесения удобрения наблюдается в течение 3 - 4 лет. Предназначен для выращивания овощных, цветочных, декоративных и других культур. Может использоваться во всех климатических зонах, на любых почвах, в открытом и закрытом грунте, при устройстве газонов и т.д. Его применение обеспечивает получение экологически чистой продукции: содержание нитратов в 6 - 8 раз ниже, чем при использовании минеральных удобрений. Тогум получают промышленным

способом, перерабатывая низинный торф с высоким содержанием гуминовых кислот.

К гуминовым удобрениям следует отнести и широко рекламируемые в последние годы удобрения «Суперкомпост» «Экоплодогумус», разработчик и производитель которых фирма «Континент-XXI». Однако, эти удобрение, несмотря на сходство по составу, воздействию, дозировкам и способам применения с другими гуминовыми удобрениями, имеет принципиальное отличие от только что рассмотренной группы. Обусловлено это тем, что сырьем для получения удобрений служит сложный комплекс компонентов переменного состава: птичий помет, навоз, отходы производства и т.д. Однако и к обычным компостам их отнести не представляется возможным, так как получают эти удобрения в заводских условиях в специально созданных установках в течение всего нескольких часов, активизируя процессы переработки исходного сырья биологически активными веществами.

В 1989 году институтом «КАТЭКНИИУГОЛЬ» на базе Ачинского глиноземного завода была создана опытно-промышленная установка по производству балластных гуматов из бурых углей Канско-Ачинского бассейна. Урожайность овощных, садовых, зерновых культур при использовании этого удобрения из расчета 5 - 10 кг / га увеличивается до 40 %, при этом созревание их ускоряется на 5-7 дней. Прибавка урожая по товарной продукции составила: на моркови –50 ц/га, на капусте – 98 ц/га, на ячмене 1,8-3,5 ц/га, на картофеле – 31 ц/га, а огурцов в теплице – 2,9 кг/ $м^2$. Таким образом, к настоящему времени накоплен значительный опыт применения торфов, сажистых углей и углегуминовых препаратов из них в самых разнообразных почвенно-климатических зонах и под различные культуры.

Очень эффективно использование гуминовых препаратов совместно с ***минеральными удобрениями***. Например, итальянская фирма «Veneta Mineraria» в 1987 году разработала проект «Умекс», включавший производство препарата «Умекс» (гумата калия) и гранулированных минеральных удобрений в гуматных оболочках. По итальянской технологии в Беларуссии были разработаны несколько новых удобрений на основе карбамида, суперфосфата и хлористого калия, обработанных

гидрогуматами или оксигуматами. Получены были следующие результаты. Применение карбамида, содержащего гидрогумат, в дозе N90-120 на фоне РК+60 т/га органических удобрений в производственных опытах с картофелем на дерново-подзолистой суглинистой почве позволяет повысить урожайность в среднем на 28 ц/га (или 8,5 %) по сравнению с карбамидом, необработанным гидрогуматом. На дерново-подзолистой супесчаной почве прибавка от применения этого удобрения составила 31 ц/га. Прибавка урожая от применения карбамида с гидрогуматом под кормовые корнеплоды по сравнению со стандартным карбамидом на дерново-подзолистой суглинистой почве при внесении дробно составила 212 ц/га, или 19,9 %, а при внесении в один прием - соответственно 285 ц/га или 26,7 %. При этом в вариантах с новыми удобрениями увеличилось содержание и сбор сухого вещества, улучшилось качество корней корнеплодов за счет снижения содержания нитратов.

Универсальное ***органоминеральное*** удобрение: содержит не менее 40% нейтрализованного аммонифицированного торфа, NPK соответственно 7-7-8, магния 1,5%, микроэлементы в оптимальном соотношении. Удобрение торговой марки «Исполин» выпускается в двух модификациях - для картофеля (содержание органического вещества до 60%, NPK - 0,6-1-5, гуминовых веществ 4%, микроэлементы, стимуляторы роста) и для овощей (ОВ до 60%, NPK 6,5-10-10, гуминовых веществ 6%, микроэлементы, стимуляторы роста). При очень экономном расходовании обе смеси оказывают долговременное положительное действие на почву, улучшают всхожесть семян и прорастание клубней, приживаемость рассады, стимулируют рост растений и способствуют значительному росту урожайности.

Целую серию гуматизированных органоминеральных удобрений выпускает НПО «Реализация экологических технологий» в г. Санкт-Петербурге. Они представляют собой модифицированные гуминовыми компонентами стандартные минеральные удобрения (карбамид, аммиачная селитра, суперфосфат, аммофос, нитроаммофоска, суперфоска, азофоска, сульфоаммофос). В качестве гуминового компонента используется гуминовый препарат, известный на рынке как

«Лигногумат», отличительной особенностью которого является высокое содержание солей гуминовых кислот. «Гумат-универсал», выпускаемый Иркутской фирмой «Гумат», характеризуется оптимальным соотношением основных элементов питания, высоким содержанием гумата, а также наличием в составе микроэлементов.

Таким образом, сравнительный анализ эффективности применения различных удобрений показывает, что все они дают хорошие прибавки урожайности, способствуют улучшению качества продукции. Немаловажно и то, что эти удобрения являются, безусловно, экологически чистыми. Так как эти удобрения еще не получили столь широкого применения, как другие виды органических удобрений, а также потому, что в зависимости от способа производства их свойства значительно разнятся, их характеристика, дозировка и способы применения должны быть в обязательном порядке указаны в паспорте данного продукта.

Продукты системы ***«Arid Grow»*** созданы на основе экологически чистого торфа и других гуминосодержащих веществ и предназначены для формирования плодородного слоя почвы на непригодных для земледелия площадях, аридных, истощенных за счет интенсивного земледелия и загрязненных промышленными выбросами земель. Россия является идеальным регионом для производства подобного вида органических и органоминеральных удобрений, поскольку обладает богатейшими запасами сапропелей и высококачественных торфов. Высокое качество российских торфов (активная органическая основа продуктов «Arid Grow»), подтверждено европейским испытательным центром «BIG Product+Markt» и Научно-исследовательским Институтом Торфяной Промышленности (Санкт-Петербург, Россия).

Для активизации азота торфа применяют различные способы его обработки, в том числе механоактивацию в мельницах различного типа. Выход гуминовых кислот в результате механохимической обработки низинного и верхового торфа в мельнице виброцентробежного типа увеличивается в 1,5-2 раза. Механоактивация торфа позволяет значительно увеличить выход фульвокислот и растворимых гуминовых кислот, с одновременным повышением их реакционной

способности. Гуминовые кислоты с повышенной реакционной способностью эффективно связывают ионы тяжелых металлов, молекулы углеводородов нефти и нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ, полиароматических и полихлорированных соединений и остаточных количеств пестицидов, солей и других естественных и синтетических токсинов.

Механоактивированная фракция торфа, полученная путем обработки в виброцентробежной мельнице, введена в состав почвомодификатора в качестве активатора процесса гумификации. Кроме того, почвомодификатор содержит биодобавки, полученные аэробной ферментацией, и стимуляторы роста. В качестве органической основы при изготовлении почвомодификатора используют измельченную смесь верхового и низинного торфа влажностью не более 40 %. Таким образом, почвомодификатор является экологически чистым высокоэффективным продуктом пролонгированного действия, который представляет собой сбалансированную систему органических компонентов, соединений макро- и микроэлементов, активных ферментов, витаминов и физиологически активных веществ. Инертная фаза диспергированного торфа с влажностью не более 40 % выполняет роль ингибитора процесса минерализации почвомодификатора, не допуская быстрой минерализации компонентов и вымывания их из почвы, обеспечивая тем самым пролонгированное действие удобрения.

Для того, чтобы обогатить торфяную основу соединениями калия, фосфора и микроэлементами специалисты компании NOP (Natural & Organic Products) разработали специальный способ получения биодобавок, входящих в состав продуктов «Arid Grow». Для получения максимально обогащенного питательными элементами комплексного удобрения, оказывающего быстродействующий эффект на развитие растений в определенные периоды вегетации (цветение, завязывание плодов и т.д.), активную органическую основу (почвомодификатор) обогащают специальными добавками (макро- и микроэлементы) и гранулируют полученный продукт. Таким образом, получают новый вид сложных ***гранулированных*** органических удобрений. Все

органические компоненты вводятся в состав удобрения в ферментированном виде.

Сочетание органического комплекса аминокислот и самых важных для растений микроэлементов (B, Mn, Cu, Zn и др.) позволяет почвомодификаторам «Arid Grow» более эффективно стимулировать фотосинтез, синтез белков, регулировать питание растений, способствовать более полному усвоению элементов питания (азота, фосфора, калия). В результате, применение почвомодификаторов увеличивает урожайность и биологическую ценность продукции. Высокое содержание органического компонента способствует структурированию почвы при использовании удобрения, повышению ее влагоемкости и интенсивному накоплению гумуса в продуктивном слое при длительном применении удобрения.

Технология производства продуктов NOP позволяет получать удобрения с высокой концентрацией натуральных питательных компонентов, устойчивых к разложению под воздействием высокой температуры, влажности и почвенной микрофлоры. Как показывают результаты модельного эксперимента, скорость биологического распада почвомодификатора «Arid Grow» почве в 6-7 раз меньше, чем скорость минерализации традиционно обработанного торфа, используемого в сельском хозяйстве и озеленении.

Результаты химического и биологического анализов показывают, что продукты серии «Arid Grow» содержат большое количество полезной микрофлоры, гумуса и питательных веществ в доступной для растений форме, включая макро-, микроэлементы и стимуляторы роста Содержание макро- и микроэлементов в мг/л: азот ≥ 500; фосфор ≥ 150; калий ≥ 300; кальций, магний ≥ 1000; железо – 5-10; бор, барий – 0,2-0,3; медь – 0,1-0,3; цинк – 0,02-0,05; марганец, кобальт, молибден, никель – 0,05-0,1; селен, торий – 0,01-0,03. Агрохимические и агрофизические характеристики: pH водной вытяжки – 4,5-6,5; общая катионнообменная емкость – 600-1500 ммоль/кг; удельная поверхность 500-600 $м^2$/г.

Внесение в песчаный грунт твердофазного почвомодификатора «Arid Grow» (10-20 % от общего объема формируемой почвы) позволяет сформировать устойчивые газонные покрытия без дополнительного использования

удобрений и избыточных количеств поливной воды, и тем самым, уменьшить расходы производителей. Технологии «Arid Grow» и в частности, специальные ***слоистые почвенные конструкции*** на основе российских органических почвомодификаторов и местных грубодисперсных материалов позволяют успешно бороться с важной проблемой сельскохозяйственного производства в условиях засушливого климата – эффектом вторичного засоления почв. Высокая эффективность и пролонгированность действия продукции «Arid Grow» подтверждена широкомасштабными тестовыми испытаниями в типичных аридных регионах: Королевстве Бахрейн, Катаре, О.А.Э., Иране, Иордании [Смагин, 2005, Smagin et al., 2005]. Эти материалы будут подробно рассмотрены в соответствующих разделах монографии.

Наряду с естественными (природными) и модифицированными органическими материалами-биополимерами на практике земледелия и городского озеленения все чаще используются искусственные ***синтетические*** материалы и препараты. Эти вещества, в отличие от специфического ОВ почвы и других природных биополимеров, как правило, имеют известное химическое строение, что предопределяет возможность прогнозирования их воздействия на экологическое состояние почв как гидрофильных или гидрофобных ПАВ, модифицирующих поверхность ЭПЧ, клеев, разрыхрытелей (пенопластов) и сильнонабухающих гелей, реагирующих с твердой и жидкой фазами почв в объеме [Кульман, 82]. Считается, что для грубодисперсных почв с низкой поверхностной энергией ЭПЧ использование ПАВ не представляется целесообразным, и наиболее действенными средствами здесь являются синтетические клеи и влагопоглотители, действующие во всем объеме почвы. На наш взгляд это положение нуждается в корректировке, поскольку именно ***поверхностно-активные вещества (ПАВ)*** с их очень небольшим расходом для получения мономолекулярных покрытий грубодисперных частиц, в комбинации с приемами почвенного конструирования, могут оказаться наиболее эффективным и экономически выгодным средством управления водным и солевым режимом

грубодисперсных почв. В частности, перспективными могут быть варианты использования жидких, а возможно и газообразных ПАВ-адсорбатов для гидрофобизации поверхности частиц подпочвенного слоя с целью прекращения капиллярного рассасывания влаги, подъема засоленных растворов и снижения испарения [Пакшина и др., 81, Мироненко и др., 2000, Смагин и др., 2008]. Вариант почвенной конструкции с гидрофобизатором в виде метилсиликоната натрия будет рассмотрен ниже в практической части данной работы.

Еще один класс синтетических полимеров – ***пенопласты*** используются в основном в качестве искусственных разрыхлителей почвы [Кульман, 82]. К этому классу относятся такие вещества как мочевинно-формальдегидный (МФП) и полиуретановый (ПУРП) пенопласты обладающие амфифильными свойствами и гидрофобный полистирольный пенопласт (ПП). Их использование в открытых грунтах было признано нерентабельным из за высокой стоимости и частичной фитотоксичности (МФП), тогда как в тепличных хозяйствах и гидропонике они с успехом заменяли традиционно применяющиеся органогенные субстраты. Еще одно экономически выгодное применение пенопластов – разрыхлителей это внесение их в дренажные засыпки для стимуляции водопроницаемости почвы и подтока влаги к дренажным трубам. При нормах расхода МФП и ПУРП порядка 700-1000 $м^3$/га (5-10 т/га) достигается ощутимое снижение плотности 10 см пахотного слоя с 1,6-1,7 г/$см^3$ до 1,1-1,2 г/$см^3$ с усилением в 2-4 раза скорости инфильтрации влаги. По нашему мнению на эти результаты стоит обратить внимание при рекультивации городских почв и грунтов вдоль автомагистралей, где переуплотнение почвы приводит практически к нулевому впитыванию и внутрипочвенному стоку, вызывая ряд неблагоприятных экологических последствий.

Высокие теплоизолирующие и отражательные свойства пенопластов позволяют их применять в качестве мульчирующих покрытий в аридных регионах. Из других положительных качеств следует отметить высокую резистентность пенопластов к микробной деструкции, что позволяет им сохраняться в почве

на срок порядка 5-10 лет. Вместе с тем присутствие в составе ряда пенопластов токсичных веществ (например, формальдегид в МФП), а также появление вредных промежуточных продуктов деструкции, наряду с экономической нерентабельностью в большинстве случаев ставят под сомнение идею расширенного использования этого класса веществ в земледельческой практике.

В 50-60^{x} годах с целью улучшения структуры и физических свойств почв были разработаны и достаточно успешно применены на практике препараты, обладающие хорошими клеящими свойствами и получившие собирательное название ***«крилиумы»***. Эти соединения (линейные коллоиды) являлись полимерными производными от трех основных источников в виде органических кислот – акриловой (CH_2=CH–COOH), метакриловой (CH_2=C(CH_3)–COOH) и малеиновой (COOH–CH=CH–COOH). Двойные связи в структуре этих кислот определяют возможность реакций полимеризации и сополимеризации, причем количество мономерных звеньев в формирующихся при этом молекулярных цепочках может достигать нескольких тысяч, в результате чего образуется гигантская молекула-полимер весом в десятки и сотни тысяч единиц. В составе подобных молекул помимо карбоксильных (–COOH), часто присутствуют другие функциональные группы, например, нитрильная (–CN) или аминогруппа (–NH_2). Они в свою очередь обуславливают не только реакционную способность этих соединений и возможность формирования водородных и валентных химических связей с реакционными центрами минеральной матрицы почвы, но и служат дополнительным источником азота при деструкции биополимеров.

Среди промышленных препаратов-крилиумов набольшую известность получили полиакриламид (ПАА), полиакрилонитрил, включая гидролизованный вариант (ГИПАН), соли полиакриловой кислоты и сополимеры, синтезированные на основе полиакрилонитрила (препараты К-4, К-6, К-9). Испытания этих веществ, проведенные в СССР, США, Англии, Бельгии, Германии, Индии, Египте и ряде других стран выявили достаточно высокую эффективность при малых дозах внесения в почву [Вершинин, 58, Абросимова, 60,

Романов, 60, Масленкова, 61, Гуссак, 61, Качинский, 62, Качинский и др., 67, Габай, 65, Мосолова, 64, 70, Мосолова, Уткаева, 77, Паганяс, 72, Ревут и др., 73, Вахба, 80, 81, Куценко, 81, Кульман, 82, Emerson, 56, Holmes, Toth, 57, De Boodt, 74]. Так обработка суглинистой дерново-подзолистой почвы дозой метакрилата натрия всего 0,05% от массы почвы практически втрое (с 24 до 67%) увеличила содержание водопрочных агрегатов [Вершинин, 58]. Использование ПАА в такой же дозе в глинистой дерново-подзолистой почве дало прирост водопрочных агрегатов на 25% [Романов, 60]. Опыты по закреплению песков растворами крилиумов, проводимые как в производственных, так и в лабораторных условиях, показали высокую эффективность этих препаратов в связывании грубодисперсных частиц [Амирасланов и др., 73, Вахба, 81]. В частности, в лабораторных опытах с аэродинамической трубой, уже при небольших дозах 5-10 кг/га препаратов К-4, К-9, ПАА, ПВС (поливинилового спирта) на поверхности кварцевого песка (44% фракции 0,1-0,25мм и 50% фракции 0,25-0,5мм) формировалась устойчивая корка, предохраняющая на 99-100% песчаные частицы от выдувания. При использовании битумной эмульсии тот же эффект достигался лишь при дозах в десять-двадцать раз больших (от 100 кг/га). В целом проведенные исследования показывают, что синтетические препараты – крилиумы, в дозах 0,05-0,1% от массы почвы являются эффективным средством воздействия на структуру почв и повышают содержание агрономически ценных водопрочных агрегатов крупнее 0,25мм на 20-100% и более. Это позитивно отражается и на других физических свойствах почвы – водопроницаемости, плотности, порозности, влагоемкости, противоэрозионной стойкости, испарении влаги, микроструктуре, реологических характеристиках. Не менее важным обстоятельством было достаточно длительное последействие от крилиумов до 4-6 лет на фоне безвредности препаратов для растений и даже некоторой оптимизации их азотного питания [Алексеев, 74, Мосолова, 70, Мосолова, Уткаева, 77, Дилкова, 75, Nielsen et al., 59].

На кафедре физики и мелиорации почв под руководством проф. И.И. Судницына аспирантом из Египта С.А. хей-Вахба было выполнено и защищено в виде кандидатской диссертации

комплексное исследование «Влияние искусственных структурообразователей на механические и водные свойства песчаных почв». В нем изучалось воздействие синтетических препаратов К-4, К-9, ПАА, ПВС при разных дозах и способах внесения на физико-механические свойства (плотность, агрегированность, твердость и водопрочность агрегатов, противоэрозионную стойкость), на водоудерживающую способность (зависимость капиллярного давления от влажности), валагопроводность, капиллярный подъем и испарение влаги, а также ее доступность растениям. Препарат К-4 синтезирован в институте коллоидной химии АН УзССР и представляет собою вязкий раствор натриевой соли полиакрилонитрила. К-9 – гидролизованный полиакрилонитрил получен путем неполного омыления в щелочной среде отходов волокна «Нитрон», состоящего из тройного сополимера нитроакриловой, метакриловой и итаконовой кислот. В его составе присутствует большое число реакционно-способных функциональных групп, включая амидные и карбоксильные. Полиакриламид (ПАА) является сильнокоагулирующим анионным полиэлектролитом, получаемым путем гидролиза акрилонитрила в кислой среде. В работе был использован технический ПАА производства Бельгии. Неионный (нейтральный) полимер ПВС (поливиниловый спирт) – продукт омыления поливинилацетата в спиртовом растворе (метаноле) в присутствии сильных щелочей (KOH, NaOH) представляет собой в зависимости от степени обезвоживания хорошо растворимый в воде белый порошок или гелевую массу. В работе показано, что наиболее эффективный и экономичный способ внесения препаратов – их распыление над поверхностью почвы в виде водных растворов. При этом как уже отмечалось выше малые дозы препаратов (порядка 10 кг/га) способствуют агрегации песчаных ЭПЧ в виде тонких корок и их надежную защиту от дефляции [Вахба, 81]. Количество агрегатов с высокой механической прочностью (2-4 кг/см^2) достигало 13-17% от массы песка при значительной доле водопрочных отдельностей (78-95%) в случае обработки ПАА и низкой водопрочности (менее 5% агрегатов) для гидрофильных структоров К-4, К-9, ПВС. Обработка полимерами уменьшает высоту капиллярного поднятия в сухом песке – ПАА в 3 раза (с

20 до 6см), ПВС, К-4, К-9 на 20-30% при одновременном снижении скорости подъема. Также снижается интенсивность нисходящего перемещения влаги особенно в состоянии насыщения почвы водой: коэффициент фильтрации под воздействием К-4 и К-9 уменьшается в 4-8 раз, а ПАА и ПВС – в 1,5 раза. Пропорционально концентрации полимеров возрастает водоудерживающая способность песка, причем уже малые дозы препаратов (0,03-0,1%) увеличивали равновесную влажность при капиллярном давлении 0,6 атм от 1, 5-2 раз для К-9 до 2-4 раз для ПВС, ПАА и К-4. Влияние на скорость испарения и консервацию влаги неоднозначно и зависит от дозы полимеров и стадий иссушения почвы, однако на стадии медленного испарения все препараты, внесенные в дозах 0,1-0,15% от массы песка снижали скорость, увеличивали на 1-3 дня сроки иссушения и в 1,5-2 раза количество оставшейся в почве влаги. Вместе с тем отмечено, что в условиях промывного режима (полива) серьезным фактором, лимитирующим позитивное действие и последействие препаратов является их вынос с током фильтрующейся влаги, достигающий 16-17% для ПАА и ПВС, 30-35% К-4 и 62-63% К-9 при промывке 25-см слоя песка 200мм воды. Акцентируем на этом внимание, поскольку в подавляющем большинстве исследований характеризуется лишь способность биополимеров оптимизировать структуру и определенные свойства почвы, тогда как их собственное поведение, в почвах как активных биокосных средах практически не рассматривается. А ведь именно оно определяет устойчивость таких веществ и вместе с эффективностью и стоимостью должно учитываться при оценке рентабельности использования биополимеров.

Для обоснования агрегирующего действия линейных полимеров-крилиумов на минеральную массу была предложена теория «молекулярного припоя», согласно которой оструктуривающие вещества должны одевать почвенные частицы сплошным мономолекулярным слоем [Мосолова, 64]. Этот поверхностно-активный слой увеличивал свободную энергию частиц на границе раздела контактирующих частиц твердой фазы и способствовал их агрегации. Из простого соотношения удельных поверхностей песчаных субстратов (1-10 $м^2/г$) и биополимеров (500-1000$м^2/г$) следует, что для

эффективного воздействия на физическое состояние грубодисперсных почв рабочие дозы таких органических препаратов могут варьировать в диапазоне 0,1-2%. Это означает необходимость внесения от 0,7 до 14 т/га (0,07-1,4 кг/м^2) веществ в слой почвы 5 см мощности. При себестоимости препаратов порядка 5-10$ за кг, затраты на 1га даже без учета расходов на транспортировку и внесение в почву составят от 3500 до 140000$. Очевидно, что если нижняя граница этого диапазона еще может быть приемлема для определенных видов хозяйств, то основная часть цифр вряд ли привлечет внимание землепользователей к данному классу почвенных кондиционеров, даже при возможном 4-6-летнем сроке последействия. Поэтому экономически оправдано использование искусственных препаратов с дозами не более 0,2% от массы почвы, среди которых могут быть либо гидрофобные ПАВ, либо сильнонабухающие гидрофильные полимеры, речь о которых пойдет далее.

Дальнейшее развитие направления по искусственному оструктуриванию и оптимизации физических свойств почв шло по пути селекции наиболее эффективных препаратов из разряда крилиумов и совершенствования технологий их промышленного получения. В результате возник новый класс комбинированных веществ – ***сильнонабухающие полимерные гидрогели*** (СПГ) или суперадсорбенты, получаемые на основе синтетических (полиакриламида, акриловой кислоты, гидролизованного полиакрилонитрила) и природных (крахмала, декстрина, целлюлозы) биополимеров. Их отличает в первую очередь чрезвычайно высокая влагоемкость. Степень свободного набухания СПГ может достигать 700-1000 г воды на каждый грамм сухого вещества и более. Это качество определило перспективность их использования в грубодисперсных почвах и грунтах, где оптимизация водоудерживающей способности является первоочередной задачей.

По мнению одного из первых отечественных разработчиков технологий синтеза СПГ профессора ИХФ РАН К.С. Казанского, существует два основных пути их получения [Казанский и др., 1986]. Первый заключается в прививке мономеров (акриламида, акриловой кислоты и ее солей) и

полимеров на крахмал в водной среде под действием химических инициаторов или γ-облучения. В процессе сополимеризации из растворов удается обогатить получаемые гидрогели азотом и микроэлементами для дальнейшего использования в качестве источника влаги и питательных элементов, например, при обработке (дражировании) семян. Так активно рекламируемая в последнее время в Московских СМИ технология выращивания кукурузы «по Лужкову» – в капсулах, обогащенных питательными веществами, является примером подобной обработки семян гидрогелем, аккумулирующим влагу и элементы питания растений. Другой способ получения СПГ – радиационное сшивание полиакриламида в присутствии некоторых добавок при γ-облучении. В 90^{x} годах в институте физической химии РАН и ряде других учреждений были отработаны оптимальные технологии получения СПГ и созданы установки, позволяющие выпускать небольшие партии высококачественных препаратов при минимальной стоимости, порядка 5-6$ за кг сухого вещества (в ценах 90^{x} гг). Параллельно производство СПГ активно развивалось за рубежом (США, Германия, Франция, Бельгия, Египет) в результате чего было создано множество торговых марок этих препаратов (SUPER-GEL, AQASORB, WATERVOX, TERRA-SORB, FLOERGEL, RAPG, PAM-G2 и т.д.).

На современном этапе СПГ, преимущественно зарубежного производства, активно рекламируют для использования в земледелии, цветоводстве, огородничестве, семеноводстве, тепличном хозяйстве, озеленении, ландшафтной архитектуре и дизайне, а также в медицине и косметике [см. Интернет сайты]. Однако их рыночная цена в десятки раз превышает реальную стоимость, а качество, оцениваемое, прежде всего по степени набухания и устойчивости этого процесса в природных условиях, оказывается ниже, чем у российских аналогов. Такое положение дел, к сожалению, не позволяет в настоящее время приступить к активному внедрению СПГ в сельскохозяйственную и муниципальную практику нашей стране, и основная часть полевых экспериментальных исследований по влиянию СПГ на свойства грубодисперсных почв производится за рубежом.

Анализируя материалы прошлых лет, можно заключить, что СПГ являются одним из наиболее мощных синтетических средств управления гидрофизическими свойствами и водным режимом почв [Barcroft, 84, Kullman, Benkenstein, 87]. Дозы отечественных СПГ 0,1-0,25% от массы почвы снижают в 1,2-1,5 раз его плотность, что создает дополнительную пористость и повышает полную влагоемкость до 30-40% против 23-25% [Грудинина, 83, Казанский и др., 86, Нурыев и др., 86]. Гидрогель К-42, полученный на основе крахмала и акриловой кислоты (ИХФ АН СССР), в дозе 0,1% к массе аридного пылеватого песка увеличивал его капиллярную влагоемкость на 5,9% (с 23,8 до 29,7%), полную влагоемкость на 3,6% (с 25,4 до 29%), наименьшую влагоемкость на 4,7% (с 11 до 15,7%). Другой СПГ в виде радиационно-сшитого полиакриламида при дозе 0,25% к массе песка снизил его плотность с 1,6 до 1,06-1,15г/см^3, увеличив тем самым вдвое пористость и полную влагоемкость. Устойчивое завядание культуры ячменя на песчаной дерново-степной почве при использовании того же СПГ в дозе 0,1% происходило на 30-40 суток позднее, чем на контроле. При этом разницы во влажности завядания по сравнению с контролем практически не было, поскольку влага, содержащаяся в СПГ, в такой же мере участвовала во влагообеспеченности роста растений, как и почвенная капиллярная.

Исследования немецких ученых [Kullman, Benkenstein, 87] показали, что обработка почвенных субстратов синтетическими гидрофильными гелями на базе объемной сополимеризации (сшивания) макромолекул винилового спирта и акриламида в различной степени способствовала прорастанию семян, стимулировала рост культур и повышала их урожайность до 30-40% благодаря оптимизации гидрофизических условий почвы – двукратному увеличению влагоемкости и снижению фильтрационных потерь влаги при дозах препаратов от 0,1-0,3 до 0,5% от массы почвы. В лабораторных опытах по инкубации почв в оптимальных гидротермических условиях в течение 1,5 месяцев была выявлена устойчивость гидрогелей к микробному разложению. Варьирование химического состава, вязкости, степени набухания и других технологических свойств гелей позволяет выбрать кондиционеры в зависимости от качества

грунта, потребностей растений и тех или иных способов внесения гелей в почвы.

Особую перспективу представляет применение гидрогелей в аридных климатических условиях. Использование американского препарата SUPER-GEL в дозах 0,05, 0,1, 0,15, 0,20% от массы тонкозернистого египетского песка привело к повышению запаса доступной для растений влаги на 117, 169, 212 и 410%, соответственно [Tayel, El-Hady, 81]. Полиакриламидные и полиакрилнитриловые гидрогели в дозах 0,1-0,2% от массы почвы способствовали увеличению в 3-4 раза полевой влагоемкости, запаса продуктивной влаги, снижали в 1,5-2 раза кумулятивные потери влаги из обработанного слоя, замедляли на 4-6 суток иссушение почвы до влаги завядания растений [El-Haddy, Tayel, 82, El-Hady, Azzam, 83, Johnson, 84, Azzam, 85]. При испытании в аридных климатических условиях Каракумов четырех видов гидрогелей препаратов AQUASORB 3005 (А и Б) французской фирмы FLOEGEL, привитого сополимера акриловой кислоты на крахмале (КУ) и радиационно-сшитого технического полиакриламида (ПАА), синтезированных в ИХФ АН СССР было показано, что их степень набухания в дистиллированной воде варьировала от 375 до 1250 г/г, причем наивысший показатель был у ПАА [Нурыев и др., 86]. В дождевой воде набухание снижалось в 1,8-2,4 раза, а в растворе из оросительного канала в 5 (ПАА) и от 8 до 100 раз (КУ)! Радиационно-сшитый полиакриламид во всех случаях показал наилучшие качества, как по водоудерживающей способности, так и по устойчивости набухания в реальных природных водах. Наилучший эффект от СПГ в песчаных почвах Каракумов проявлялся в дозе 0,15% от массы субстрата.

В исследовании, проведенном в Саудовской Аравии [Al-Darby, 96] выявлено, что дозы гель-формирующего кондиционера Jalma от 0,2 до 0,8% от массы аридного песка привели к экспоненциальному росту капиллярно-сорбционного давления и аналогичному падению гидравлической проводимости, что в свою очередь позволило снизить до минимума непродуктивные потери поливной влаги. Препарат RAPG (Reclaimer-Ameliorator Polimeric Gel), синтезированный египетскими учеными, при внесении в песок в дозе 0,1% улучшал его гидрофизические характеристики, ионообменную

способность и биологическую активность до уровня окультуренной глинистой почвы долины Нила, причем эффективность использования почвенной влаги и поглощения питательных веществ растениями для обработанного песка были даже выше, чем в глинистой почве [Reda, Azzam, 82]. Степень набухания этого гидрогеля достигает 750 гH_2O/г сухого вещества. Впервые в данной работе была дана оценка водоудерживающей способности по основной гидрофизической характеристике и показано, что при pF 2,4-2,6 доза RAPG 0,1% приводит к повышению влагоемкости песка с 1,5-2% до 10-13% от массы почвы. При этом увеличиваются биологическая активность (дыхание), азотфиксация и урожайность растений.

Как показывают работы физиологов, СПГ имеют непосредственное положительное действие на сами растения – всхожесть семян, урожайность, длину и массу корневых систем, содержание хлорофилла, азотфиксирующую способность микоризы и ряд других свойств, причем варьирование роста этих показателей составляет от 20-40% до двукратной величины. [Пронина и др., 91, Azzam, 85].

Вместе с тем отмечаются и проблемы при использовании СПГ в реальных природных условиях. Это в первую очередь – подавление набухания электролитами почвенных растворов, особенно в засоленных регионах [Нурыев и др., 86, Лагутина, 96, Johnson, 84]. В ИХФ РАН им. Н.Н. Семенова в рабочей группе проф. К.С. Казанского были предложены оригинальные методики измерения давления набухания СПГ и на базе фундаментальных уравнений Флори-Хиггинса и Доннана сформулирована математическая модель, удачно прогнозирующая поведение гидрогелей в растворах электролитов и пористых средах [Дубровский и др., 90, Лагутина, 96, Лагутина и др., 95]. В этих работах впервые были рассмотрены на количественном уровне факторы, ограничивающие набухание гидрогелей в реальных, близких к почвенным условиях, что позволило внести коррективы в процесс синтеза СПГ и получить одни из наиболее устойчивых и эффективных гидрогелей на основе радиационно-сшитого полиакриламида с добавками электролитов. Именно этот тип СПГ, синтезированный в вышеупомянутом институте был взят за основу в нашей работе. Второе немало важное обстоятельство

заключается в том, что с развитием теории и методов оценки свободного набухания СПГ появилась возможность прогнозировать его вклад в водоудерживающую способность почв. В монографии [Смагин, Садовникова, 2009] приведены результаты наших исследований в данной области в виде модели зависимости капиллярно-сорбционного (матричного) давления от содержания влаги в почвах с СПГ, основанной на идее аддитивности собственно каркасного потенциала (давления) влаги грубодисперсного субстрата и давления набухания гидрогеля в нем.

Справедливости ради отметим и негативные отзывы о малой эффективности СПГ в песчаных почвах или вообще отсутствия таковой [Петров, Рогачев, 91]. На наш взгляд подобные результаты во многом объясняются спецификой внесения и распределения СПГ в почвах. Например, равномерно внести и распределить в рабочем 5-10 см слое почвы полимер в дозе 0,05-0,1% (то есть составить сухую смесь 1:1000- 1:2000) в производственных, да и в лабораторных условиях практически невозможно. Авторский опыт показывает, что вначале надо дать полимеру набухнуть, а затем уже в состоянии геля вносить его в почву [Смагин, Садовникова, 94]. В этом случае эффект от обработки не замедлит сказаться. Сухой же препарат, независимо от тонины помола никогда не реализует в полной мере потенциальную способность к набуханию из-за ограниченности порового пространства и доступа влаги внутри песка, и уж конечно никогда не будет равномерно распределен в почве.

Резюмируя данную часть обзора, можно заключить, что сильнонабухающие полимерные гидрогели – почвенные кондиционеры нового поколения являются перспективным средством регуляции гидрофизических свойств грубодисперсных почв, позволяющие в несколько раз повысить их влагоемкость в широком диапазоне варьирования влажности при относительно небольших (0,05-0,2%) дозах полимера. Наиболее эффективными кондиционерами являются СПГ на основе радиационно-сшитого полиакриламида, устойчивые к воздействию электролитов и способные к значительному набуханию в пористых средах. Вместе с тем на фоне обилия публикаций о сиюминутных эффектах от внесения СПГ,

практически ничего не известно об интенсивности его биодеградации, выноса с поливными водами, влияния на водопроницаемость; отсюда отсутствие научно-обоснованных технологических решений по способам, срокам и дозам внесения СПГ в почвы. В наших исследованиях, наряду с комплексной оценкой поведения СПГ и их воздействия на физическое состояние почв, были предприняты попытки составить подобные технологические рекомендации в качестве научного обоснования успешно реализуемых в ряде стран Персидского залива технологий почвенного конструирования в рамках российско-арабского проекта «Arid Grow» [Смагин, Садовникова, 94, 2009, Смагин и др., 99, Smagin et al., 2005]. В настоящее время отечественным лидером по передовым биотехнологическим разработкам в области синтеза СПГ с собственным промышленным производством является Институт технической химии УрО РАН. Его продукция превосходит по ряду функциональных параметров и устойчивости к потенциально неблагоприятным эдафическим факторам зарубежные аналоги [Стрельников и др., 2007, Будников, 2009, Будников и др., 2010]. Личные творческие контакты с данной рабочей группой позволили использовать данную продукцию в пилотном проекте почвенных конструкций для озеленения городских территорий с почвышенной антропогенной нагрузкой в условиях столичного мегаполиса, результаты которого вошли в настоящую монографию.

Помимо природных, модифицированных и синтетических материалов, использующихся в почвах и почвенных конструкциях для улучшения их качества и, прежде всего экологических свойств, влияющих на продуктивность растений, можно выделить еще один класс материалов, разрабатываемых и применяемых в целях почвенно-ландшафтного конструирования и геоэкологии. ***Геоматериалы***, имеют, как правило, смешанное или синтетическое происхождение и их использование оправдано в условиях техногенных, урбаногенных ландшафтах в конструкциях, направленных на геостабилизацию земной поверхности против действия природных (эрозия, дефляция, движение грунта, осыпи, обвалы, подтопление, сейсмическая активность) и антропогенных (строительство, прокладка коммуникаций) факторов. Среди них

разнообразные варианты ***геотекстиля*** в виде тонких гибких полотен, получаемых посредством соединения волокон или нитей из синтетического или вторичного сырья, включающего, в том числе несинтетические компоненты. Геотекстили подразделяются на нетканые (механически скрепленные; термически скрепленные, плетеные) и тканые. Основными факторами, формирующими технические свойства геотекстильных материалов являются: технология производства, сырье (полиэфир, полипропилен, полиэтилен, поливинилхлорид, арамид, полиамид), форма и размер отдельных синтетических волокон материала.

На современном рынке предлагаются варианты геотекстиля для различных областей транспортного, гидротехнического, гражданского и специального строительства. Основные экологические свойства геотканей, как строительных материалов: биостойкость, химическая устойчивость, светостойкость, износостойкость, высокая температура плавления, высокая прочность на разрыв (от 8 кН/м до 1500 кН/м) при относительно невысоком удлинении. Температурный режим эксплуатации материалов: от – 400^{o}С до +1000^{o}С. Армирование грунта высокопрочными геотканями позволяет вести строительство в сложных инженерно-геологических и климатических условиях. При использовании высокопрочных геотканей в качестве арматуры отпадает необходимость в замене слабого непрочного грунта основания, проведения предварительных мероприятий по улучшению свойств грунтов или отсрочки строительства на время их консолидации. Слабые грунты совместно с высокопрочными геотекстильными материалами могут быть успешно применены при строительстве подпорных сооружений.

Близкие по функциональным свойствам и области применения ***биотекстильные материалы***, представляют собою природную или органическую продукцию из растительных волокон. Они как правило имеют меньший по сравнению с геотекстилем срок службы из за подверженности микробной деструкции и, соответственно цену. Вместе с тем их эффективность при использовании в противоэрозионных почвенно-грунтовых конструкциях (укрепление откосов, склонов, защита от размывания берегов, мульчирование

поверхности от пыления и испарения влаги) доказана практикой, и биотекстильные материалы активно применяются в почвенно-ландшафтном конструировании за рубежом, а в последние десятилетия и в нашей стране. В частности кампания «Геотерра» предлагает спектр биотекстильных материалов (соломенные, кокосовые и кокосово-соломенные маты BonTerra S, BonTerra K, BonTerra SK, джутовые и кокосовые геосетки BonTerra CN, BonTerra J, влагоемкие диски для мульчирования почвы BonFLORA).

Противоэрозионные биогеотекстили BonTerra обладают свойством биодеструкциии эффективны на откосах крутизной до 45^0. Их преимущества – возможность противоэрозионной защиты обводненных и подтопляемых откосов любой длины, а также каналов и ручьев, у которых скорость течения водного потока достигает 6 м/с. Применение натуральных противоэрозионных материалов, имеющих в своем составе семена многолетних трав, позволяет производить укрепление откоса без применения плодородного слоя почв, что значительно упрощает проведение строительных работ и снижает их стоимость.

Георешетки и геосетки как одноосные, так и двухосные, зарекомендовали себя, как надежный и дешевый строительный материал из высокомодульных полиэфирных нитей, стекловолоконных нитей с защитным слоем из поливинилхлорида или битума. Разработан и предлагается на московских рынках широкий спектр георешеток и геосеток по прочности (от 20 кН/м до 1500 кН/м) и по размеру ячеек (от 15 мм до 40 мм). Одна из целей использования этих материалов – армирование несвязного грунта основания с целью повышения его несущей способности при ремонте и расширении дорог, взлетно-посадочных полос и иных видах плоскостного строительства. Оптимальная связь (адгезия) георешеток и геосеток с грунтом достигается правильным подбором георешеток с учетом гранулометрического состава грунта. Эффект блокировки частиц грунта с георешетками достигается при оптимальном соотношении размеров ячейки с размером частиц грунта. Результаты исследований показывают, что угол трения на контакте георешетка (геосетка) – грунт больше значения угла внутреннего трения самого грунта (даже для

некондиционного грунта). Кроме того, армогрунтовые конструкции с использованием в качестве арматуры георешетки могут иметь различную облицовку (растительный покров, бетонные облицовочные блоки «Армоблок»). Если асфальтобетонное покрытие хотя бы один раз было армировано георешетками (геосетками), то других мер по усилению уже не требуется. В случае же необходимости проведения текущего ремонта верхнего слоя асфальтобетонного покрытия армированного георешетками или геосетками, применяется традиционная методика фрезерования и переработки старого покрытия. Измельченная георешетка в полученной смеси работает как фиброарматура. Все георешетки и геосетки для армирования дорожных одежд изготовлены из экологически безопасного материала, не причиняющего вред окружающей среде.

Геомембраны изготавливаются из полиэтилена высокой и низкой плотности различной толщины с гладкой или структурированной поверхностью. Геомембраны характеризуются высокими антикоррозийными и гидроизоляционными свойствами, гибкостью, безусадочностью, трещиностойкостью, имеют хорошие механические характеристики в сочетании с инертностью к кислотам и щелочам (возможно, применять для хранения жидкостей с pH от 0,5 до 14). На свойства геомембраны не оказывают влияния колебания температур и ультрафиолетовое облучение, так как геомембраны не содержат добавок или наполнителей, которые могут способствовать процессу старения и снижению их физико-механических характеристик. Эти свойства, а также относительное удлинение до 850 % позволяет с успехом применять геомембраны для устройства надежных противофильтрационных экранов.

Геомембраны обеспечивают полную изоляцию даже от наиболее токсичных веществ (для изоляции свалок, отходов), широко применяются в качестве гидроизоляции гидросооружений и тоннелей, такой материал является механически стабильным и химически инертным, как к кислотным, так и к щелочным веществам (в пределах pH 2-12). Производятся также геомембраны со специальными свойствами: хорошо растягивающиеся, высокопрочные на разрыв или

выдерживающие высокие температуры и ультрафиолетовое излучение. Геомембраны с текстурированной поверхностью (с одной или двух сторон) используются для повышения сцепления между защитным слоем и гидроизоляцией, так и между геомембраной и грунтом для увеличения угла заложения откосов грунтовых сооружений. Основные технологические преимущества использования геомембран: абсолютная водонепроницаемость, наличие вертикального противофильтрационного барьера, химическая стойкость к воздействию широкого спектра загрязняющих веществ, высокая сопротивляемость механическим перегрузкам, включая сейсмическую устойчивость, высокая скорость выполнения сварочных (скрепительных) работ, простота транспортировки и складирования материалов, низкие затраты на строительство и поддержание объекта и т.д.

Наряду с полиэтиленовыми геомембранами с целью гидроизоляции используются рулонные материалы – ***бентонитовые маты***. Они представляют собою композиционный геосинтетический материал, в виде иглопробивного каркаса из полипропиленовых волокон, внутри которого помещены гранулы натриевого бентонита. Бентонит натрия при полной гидратации имеет свойство разбухать и увеличиваться в объеме в 14-16 раз. При ограничении пространства (это может быть достигнуто обжатием материала в обеих сторон) для свободного разбухания в присутствии воды образуется плотный гель, который препятствует дальнейшему проникновению влаги (коэффициент фильтрации ~10^{-11} м/сек). Это свойство, а также нетоксичность и химическая стойкость, важны при строительстве фундаментов зданий и других подземных сооружений. Геосинтетическое покрытие «Lintobent» является международным промышленным стандартом для гидроизоляций на минеральной основе.

Проблема избыточного увлажнения, подтопления фундаментов зданий и подземных коммуникаций значительной части городских территорий на практике решается не только с помощью гидроизоляционных материалов, но и посредством строительства специальных почвенных конструкций в виде дренажа. Используемые при этом материалы могут иметь природное происхождение (щебень, грубозернистый песок,

растительные волокна и фашины), быть получены из минеральных природных компонентов при обработке (гончарные трубки, керамзит, шлаки) а также синтетическим путем (пластмассовые трубки, пенопласты, монтажные пены и т.д.). Современные ***дренажные геосинтетические материалы*** характеризуются хорошими фильтрационными и водоотводными свойствами, устойчивостью к биодеструкции, термическим и механическим повреждениям. Срок эксплуатации дренажа из полимеров – 50 лет и более. Качественные дренажные трубы поставляют на отечественный рынок такие фирмы, как UPONOR и MABO (Финляндия), REHAU и FRANKISCHE (Германия), WAVIN (Дания) и «РУСТЕХПЛАСТ» (Россия). Легкость этих изделий делает их удобными в транспортировке. Вес дрены длиной 50 м примерно 25 кг. Для предохранения от заиливания, забивания отверстий песком и почвой некоторые марки дренажных труб снабжают оболочками из фильтрующего материала. Существуют фильтры двух видов: из специальной синтетической тканевой намотки (геотекстиль) и из натурального кокосового волокна. Геотекстиль применяют на песчаных, супесчаных и торфяных почвах. Дренаж с фильтром из кокосового волокна укладывается в суглинках и глинах. Цена 1 погонного метра поливинилхлоридной трубы с геотекстильным фильтром составляет порядка 1,9$, с кокосовым –3,6$; стоимость полиэтиленовых труб – 1,5$/м (в ценах 2005 г).

Габионные конструкции применяются свыше ста лет в области стабилизации грунтов, подверженных различным эрозионным процессам. Они представляют собою объемные сооружения в виде заполненной крупными камнями или иным материалом геосетки из жестких волокон или металла. Основные объекты применения: дорожные и железнодорожные насыпи, укрепление откосов, берегов водоемов, рекультивация оврагов и отработанных карьеров, лицевая грань армогрунтовых конструкций искусственных сооружений и т.д. Аккумулируя в себе частички грунта, габионы и матрацы Рено приобретают еще большую прочность и становятся частью природного ландшафта. Металлическая сетка двойного кручения из которой изготовлены конструкции, армирована и имеет переменную разрывную нагрузку от 3500 до 5000 кг, что позволяет габионам

противостоять внешним нагрузкам без разрыва. Высокая проницаемость габионных конструкций исключает возникновение гидростатических нагрузок. Дренажность и устойчивость делают их идеальными для защиты склонов. Габионы и матрацы Рено поглощают возможные осадки грунта без разрушения самого сооружения. Это качество является особенно важным в условиях нестабильных грунтов, а также в зонах их размыва. Эффективность габионных конструкций не уменьшается, а возрастает с годами, так как со временем происходит уплотнение наносов и грунта в пустотах габионов, матраца Рено и начинается рост растительности.

Габионные конструкции и матрацы Рено являются более экономичными, чем жесткие или полужесткие конструкции, по целому ряду причин. Наиболее важными из них являются малые затраты на эксплуатацию, простота конструкций, не требующая квалифицированной рабочей силы, возможность использования местных материалов (щебня, камней) для наполнения габионов, минимальные объемы подготовительных работ (простое выравнивание поверхности), отсутствие затрат на устройство дренажных систем. Благодаря тому, что габионные конструкции не препятствуют росту периферийной растительности и сливаются с окружающей средой, они представляют собой естественные строительные блоки для украшения ландшафта. По сути, габионы являются уже не материалами, а собственно почвенно-грунтовыми конструкциями, анализу которых посвящен следующий раздел.

1.4. Виды и технологические схемы почвенных конструкций различного функционального назначения.

В антропогенных условиях создается и непрерывно изменяется достаточно специфичный почвенный покров, включающий в себя различные сочетания естественных, частично-нарушенных и заново сформированных (построенных) человеком почвенных объектов. Их классификация, таксономия и морфодиагностика разрабатывались в последние десятилетия ведущими почвенно-географическими школами России (СССР), США, Германии, Франции, Китая, Австралии, что нашло отражение в ряде обобщений на данную тему (Классификация

почв России, 97, 2004, Мировая База Почвенных ресурсов WRB, 98, Почвенная карта мира ФАО/ЮНЕСКО, 94), согласно [Герасимова и др., 2003]. Подобные объекты относят к антропогенным и антропогенно-измененным почвам, а по видам воздействия выделяют группы техногенных, агрогенных (земледельческих) и урбаногенных почв. В ряде работ ведущим генетически фактором сильно нарушенных или заново создаваемых человеком за относительно малый срок времени почвенных объектов выделяют технопедогенез [Классификация почв, 97, 2004, Белобров и др., 2002, Замотаев, Белобров, 2007, Замотаев, 2009]. Такие объекты, по мнению авторов, нельзя считать почвами, а следует классифицировать как «техногенные поверхностные образования» или «почвоподобные техногенные образования», поскольку их материал еще не успел пройти стадии почвообразования в силу короткого времени существования. Это положение на наш взгляд дискуссионно, поскольку целенаправленно возводимые человеком по законам природной организации почв конструктоземы не должны особенно отличаться от природных аналогов и по составу, и по структуре, и по функциям. Они являются устойчиво-функционирующими рукотворными объектами, подтверждающими креативные возможности человека в создании оптимальных почвенных конструкций за короткое время в условиях, где аналогичные природные почвы формируются веками. Технический фактор здесь конечно имеет место, но лишь как средство в руках человека, а не некая обособленная самостоятельная сила педогенеза.

Резюмируя известную информацию в данной области, можно предложить следующую ***группировку почвенных конструкций***, целенаправленно создаваемых человеком с использованием как ручного труда, так и технических средств:

- земледельческие искусственно создаваемые почвы;
- локальные и сплошные почвенные конструкции для озеленения, благоустройства и рекультивации земель;
- почвенные конструкции плоскостных спортивно-игровых сооружений;
- технические геостабилизационные конструкции;
- технические почвенно-мелиоративные конструкции.

Рассмотрим их подробнее по отдельности. ***Земледельческие почвенные конструкции,*** как правило, создаются и существуют столетиями. Основной фактор их формирования – внесение органических веществ, сопутствующих материалов и удобрений, направленное на улучшение качества исходных почв и их плодородия с целью устойчивого продуктивного земледелия. Под действием человека и природных факторов в таких почвах формируются мощные (от 30см и более) гумусово-аккумулятивные и органогенные горизонты, сосредотачивающие в себе необходимые для получения устойчивых высоких урожаев качественной сельскохозяйственной продукции запасы влаги и питательных элементов. Тем самым антропогенное формирование подобных объектов осуществляется в соответствии с закономерностями природной биогенной организации, рассмотренными в первой части обзора (§ 1.2). К данному классу почв, соответствующему по международной классификации антросолям, можно отнеси высокоокультуренные почвы садов и огородов (пример рукотворных монастырских и лагерных почв о-ва Валаам, Соловецких островов), древнеорошаемые ирригационно-аккумулятивные почвы речных долин античных цивилизаций (Нил, Междуречье, Среднеазиатские реки…) и рисовых плантаций (Азия, Малазия), насыпные почвы «хейлуту» Лессового плато в Китае, североевропейские рукотворные почвы «плагген» и ряд других объектов, различающихся по технологиям создания и материалам [Герасимова и др., 2003]. Эти почвы чаще всего отличает длительность и постепенность формирования на фоне ручного, кропотливого труда с постоянным внесением больших доз органических материалов порядка 1 кг/м^2 в год. В условиях теплого влажного климата такие вещества практически полностью минерализуются и лишь малые их количества переходят в гумусовый фонд почвы. В результате прирост вверх подобных почв редко превышал несколько сантиметров за столетний период [Герасимова и др., 2003]. Отсюда на создание мощных гумусово-аккумулятивных слоев почв до 50см и более уходило от нескольких веков до 2-3 тысячелетий. Это обстоятельство, равно как и органическая технология формирования данного класса почв роднит их с

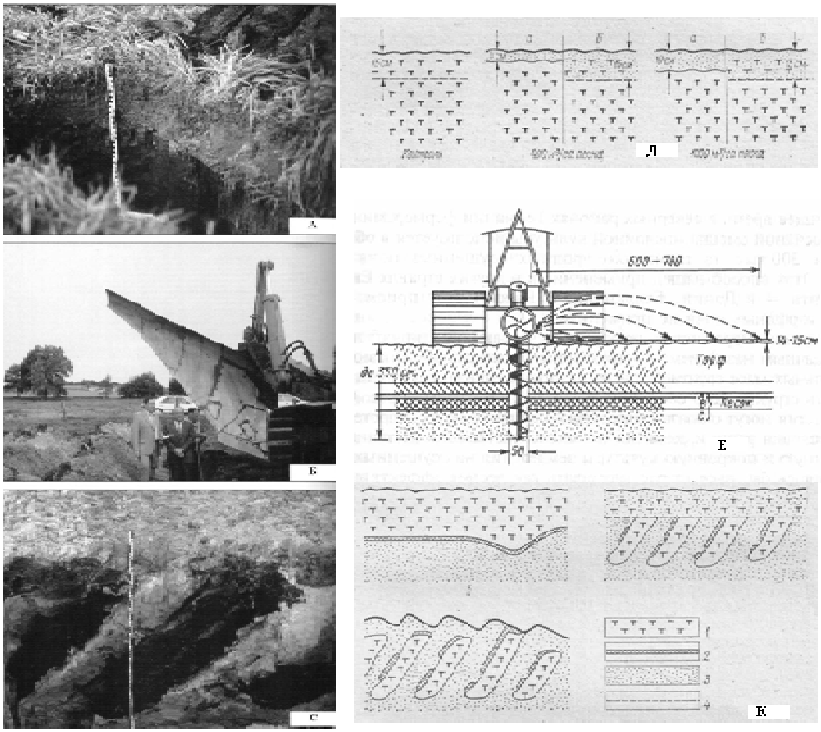


Рис. 1.16. Земледельческие почвенные конструкции на осушенных торфяниках и технические средства их реализации по материалам [Бамбалов, 83, Зайдельман, 2009]. А – покровная культура (фото), Д – схема и дозы песка покровной культуры (а) и смешанной культуры (б) в экспериментах Полесской опытно-мелиоративной станции; С, К – немецкая послойно смешанная культура (фото и схемы) 1– торф, 2– наилок, 3 – песок, 4 – граница пахотного слоя; Б – плуг Оттомайера для создания немецкой послойно смешанной культуры (фото); Е – шнековая машина для извлечения подстилающих торф песчаных грунтов при создании покровной (римпауской) и смешанной культур.

природными аналогами, в частности черноземными почвами, формирующимися в естественных условиях за 2-3 тысячи лет и более (см. рис. 1.11).

Отдельное место в данной общности земледельческих почв занимают почвенные конструкции так называемой

структурной мелиорации осушаемых торфяников (рис. 1.16). В отличие от минеральных субстратов рассмотренных выше рукотворных почв, органогенные отложения уже содержат в избытке органическое вещество, и в задачу земледельцев входит его сохранение, усиление гумификационных процессов, защита от эрозии, механического воздействия обрабатывающих орудий и техники, микробной деструкции. С этой целью применяются три вида технологий смешанное пескование, послойно-смешанное пескование и покровная (римпауская) культура [Бамбалов, 84, Зайдельман, 2009]. Метод смешанного пескования (sandmischkultur в Германии) сводится к внесению на поверхность осушенного или выработанного торфяника больших доз минерального, преимущественно песчаного грунта (200-600 т/га и более) с последующим перемешиванием с торфом при вспашке. Изначально он применялся в северных районах России, Германии, Голландии и в Скандинавских странах, откуда возникло его второе название – «северный» [Бамбалов, 84]. Минеральные добавки в торфяной грунт улучшают его теплофизические, гидрофизические свойства, актуальное плодородие (калийный, азотный, фосфатный режимы), компенсируют недостаток растений в кремнии, что значительно (до 140% и более) повышает урожайность и качество продукции многолетних трав, зерновых и иных возделываемых культур. При этом пескование является разовым мероприятием, а его положительный эффект проявляется постоянно в течение многих лет сельскохозяйственной эксплуатации участка [Бамбалов, 84, Зайдельман, 2009]. Из отрицательных факторов смешанного пескования рядом авторов указывается на возможность усиления биодеструкции торфа при внедрении в него минеральных грунтов [Бамбалов, 84, Зайдельман и др., 2001], хотя есть и противоположные данные о снижении темпов разложения органогенного материала и усиления гумификации при подобном воздействии [Бамбалов, 84].

Оригинальный вариант технологии пескования или так называемая немецкая послойно смешанная культура были предложены и получили широкое распространение в 30^{x} годах в Германии благодаря конструкторской разработке В. Оттомаером специального плуга, позволяющего производить

глубокую вспашку с оборотом всего торфяного слоя (рис. 1.16 Б). Такая технология применима для относительно небольших по мощности торфяников от 0,5 до 2,4 м, подстилаемых минеральными отложениями легкого гранулометрического состава. В результате обработки торфяные пласты устанавливаются в почве в виде наклонных слоев под углом порядка 40-45^{o}, а пространство между ними заполняется песчаным грунтом (схема К на рис. 1.16). Также сплошной песчаный слой порядка 15 см формируется на поверхности и в дальнейшем он окультуривается традиционным способом с внесением удобрений и механической обработкой. Удаление от поверхности торфяных блоков должно предохранять их от механических воздействий и быстрой деструкции, а косо-слоистое расположение среди песчаного материала – улучшать фильтрационные и теплофизические свойства. Корни растений по мере развития достаточно быстро достигают слоя с торфяными блоками, используя запасенную в них влагу и элементы минерального питания, в результате чего на подобных конструкциях продуктивность растений стабильно выше по сравнению с исходными торфяными почвами. Вместе с тем по данным [Зайдельман и др., 2001, Зайдельман, 2009] и в этом случае, как и при смешанном пескование может возникать акселерация биодеструкции органического вещества.

Покровная или так называемая римпауская культура (по имени впервые предложившего эту технологию немецкого фермера Г. Римпау) заключается во внесении на поверхность торфяной почвы минерального грунта слоем не менее 10-15см, который при последующих сельскохозяйственных обработках практически не смешивается с нижележащим торфяным слоем (рис. 1.16 А, Д). Предложен специальный механизм, который позволяет производить конструирование подобных почв на достаточно больших территориях при условии подстилания торфяников отложениями легкого гранулометрического состава (рис. 1.16 Е). Это устройство извлекает подстилающий песок с помощью шнека и разбрасывает его на поверхности торфяника на расстояние одного прохода порядка 6-7 метров. Траншея, возникающая после прохода шнека, заполняется торфом с помощью синхронной фрезерной обработки поверхностных горизонтов. Покровная (римпауская) культура надежно

защищает торфяной массив от дальнейшей деградации, причем не только механической (уплотнение, распыление) при обработке техникой, но и, что самое важное – от возгорания и интенсивной минерализации под действием почвенной микрофлоры – главных факторов деградации и физического уничтожения осушенных торфяников [Бамбалов, 84]. Покровное пескование расширяет возможности сельскохозяйственного использования осушенных органогенных почв с возделыванием не только почвосберегающих многолетних трав, но и зерновых, и даже пропашных культур (картофель, турнепс, свекла, кукуруза) [Зайдельман, 2009].

Рассмотренные выше технологии структурной мелиорации отличаются от традиционных способов окультуривания почв в земледелии применением оригинальных технических средств, позволяющих производить значительные объемы земляных работ, а также кратковременностью коренной обработки с целью конструирования необходимых в данных условиях функциональных горизонтов-слоев. Сходные принципы заложены в технологиях создания ***почвенных конструкций*** для целей озеленения, благоустройства и реализации биологического этапа рекультивации земель. Система функциональных горизонтов создается за короткий интервал времени с использованием больших объемов привозных материалов и технических средств их размещения. Условно этот класс почвенных конструкций можно разделить на ***сплошные*** (под травянистой растительностью) и ***локальные*** (под деревьями и кустарниками) [Смагин и др., 2008]. В самом простом и наиболее часто применяемом варианте на поверхность имеющегося почвогрунта наносится слой так называемого растительного субстрата, обогащенного органическим веществом, биофильными элементами и обеспечивающего на первых порах потребности зеленых насаждений в корневом питании. Мощность подобного аккумулятивного слоя колеблется от 3-5 см до 30-50см и выше, например, при рекультивации техногенных отвалов, свалок и иных непригодных для спонтанного зарастания отложений. Вопрос о достаточной мощности культурного слоя при спонтанном (не обоснованном научно) проектировании конструктоземов под озеленение городских и нарушенных

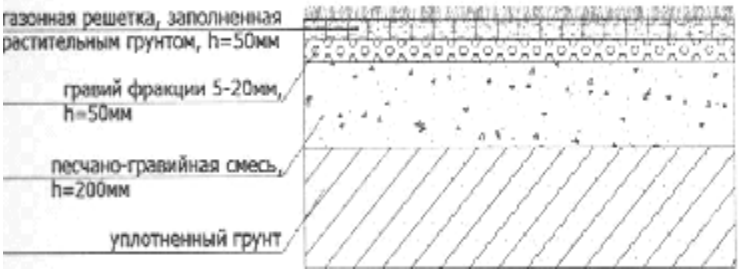


Рис. 1.17. Схема почвенной конструкции для озеленения городских территорий с повышенной нагрузкой на поверхность (проект НИиПИЭГ, м-рн Куркино, 2002-2003гг)

земель чаще всего решается в пользу максимальной экономии средств и трудозатрат. В результате быстрота возведения подобных объектов как правило оборачивается их неустойчивостью и быстрой деградацией с неизбежным угнетением роста вплоть до гибели зеленых насаждений, о чем уже говорилось вначале данной главы (§ 1.2). Так примером подобного проектирования является предложенный НИиПИЭГ вариант озеленения с использованием газонных решеток (рис. 1.17). Мощность растительного слоя, как видно из проектной схемы не превышает 5 см, а разу вслед за ним идет комбинация слоев грубодисперсного материала (гравия, песчано-гравийной смеси) с практически нулевой водоудерживающей способностью (неуплотняемый дренаж). То есть газон на такой конструкции должен довольствоваться разовым запасом влаги не более 10-15 мм (запас, соответствующий наименьшей влагоемкости растительного грунта), которого при транспирации порядка 3 мм/сут хватит лишь на 5 дней. Если не поливать подобную систему (а в проекте нет указаний на данный вид мероприятий) газон неминуемо погибнет, поскольку вероятность дожей с интервалом менее 5 суток в условиях московского мегаполиса особенно в летнее время крайне мала (рис. 1.3). Это собственно и подтверждается реальностью. В Приложении приведены иллюстрации (фото 4) неизбежной судьбы подобных газонов с наступлением кратковременных летних засух.

По действующим муниципальным Правилам создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы, Нормам и Правилам проектирования комплексного благоустройства на территории г.Москвы (Постановления № 743-ПП, №623-ПП) растительный слой должен иметь мощность не менее 20-30см, что к сожалению на практике фактически никогда не выдерживается. Сплошные почвенные конструкции под ***газонную растительность*** формируют на предварительно подготовленном и спланированном растительном грунте с соблюдением уклона основания порядка 3-4^{o} и после обеспечения раздельного стока воды с плоскостных сооружений и внутрипочвенного стока, для чего необходимо основательное рыхление газона. Последняя операция также часто игнорируется при проведении озеленения после строительства, отчего внутрипочвенный сток на уплотненных строительной техникой и рабочими грунтах особенно утяжеленного гранулометрического состава (морены, покровные суглинки) становится близким к нулевому. Толщина слоя растительного почвогрунта, как уже отмечалось, принимается для обычного, партерного и мавританского газонов равной 20см, а для спортивного – 25 см. При устройстве газонов на сильно фильтрующих грунтах между растительным грунтом и дренирующим основанием рекомендуется укладывать водозадерживающий слой из суглинков толщиной 5-10см, перекрывая его привезенным плодородным почвогрунтом в виде горизонта 20см мощности. Это положение Правил на наш взгляд не бесспорно и вместо столь сложной в технологическом исполнении и ресурсоемкой конструкции можно рекомендовать внесение в поверхностный слой водоудерживающих почвомодификаторов в виде торфа или СПГ. Создавать газоны в условиях г. Москвы лучше вначале вегетационного сезона (первая декада мая) или ближе к его завершению в августе-сентябре, чтобы миновать естественный засушливый период на ранних стадиях формирования растительности. Норма высева свежих семян порядка 20г/м^2 с заделкой на глубину до 1см с помощью легких борон или катков с рельефной поверхностью. Мелкие семена (<1мм) высевают в смеси с сухим песком в соотношении 1:1 по объему. Хорошие результаты дает способ внесения семян в смеси с низинным торфом, который на первых

порах обеспечивает их прорастание и водно-минеральное питание без дополнительных химических удобрений.

Для создания декоративных и устойчивых газонов рекомендуется использование различных травосмесей, принцип составления которых заключается в композиции трав различных типов кущения, расположения и мощности корневых систем, различной высоты вегетативных органов. Так могут использоваться следующие травосмеси: В хорошо освещенных местах: мятлик сплюснутый (30%)–овсяница овечья (30%)–овсяница красная (40%); Второй вариант: овсяница красная (50%)–мятлик луговой (30%)–райграс пастбищный (20%). В затемненных местах (в том числе под деревьями): мятлик лесной (40%)–мятлик луговой (20%) – овсяница красная (25%)–овсяница овечья (15%). Частым компонентом городских газонов являются бобовые в виде донника белого и желтого, различных видов клевера, оптимизирующие азотный режим почвы. В связи с проблемой техногенного засоления и периодических засух перспективно использование наиболее толерантных к этим факторам злаковые трав (пырей, райграс, житняк, костер безостный, свинорой пальчатый) и интродуцированных видов из практики озеленения южных регионов (бермудская трава, канадский газон и т.д.).

Газон применяется как простейшее средство укрепления земляных откосов от размыва их поверхностными водами и ветровой эрозии. При этом склоны покрываются слоем растительного грунта толщиной 10-15 см. По нашему мнению равномерная мощность аккумулятивного слоя на протяжении всего откоса не годится, поскольку верхние элементы склона, откуда будет под действием силы тяжести удалятся вода, должны иметь повышенную влагоемкость, а значит и мощность растительного почвогрунта вплоть до 2 кратного превышения (30см). Только при относительно небольших (<15-17^{o}) уклонах допустимо размещение почвогрунта просто по поверхности с последующим укреплением корневыми системами растений. Для более крутых склонов и откосов необходимо устройство специальных решеток (сот), вертикальных щитов, деревянной опалубки, разграничивающей почвогрунта на отдельные элементы во избежание его оползания. Альтернативная мера подготовки – террасирование склонов, особенно при их

большой крутизне. Максимально допустимые углы грунтовых откосов при искусственном формировании рельефа не должны превышать 27-30^{o} для песков и супесей, 40^{o} для суглинков и 60^{o} для глин. При этом откосы должны обязательно укрепляться с использованием растительности и (или) современных гестабилизационных технологий и материалов (см. далее).

Для укрепления откосов и предохранения их от размывания часто используется сплошная одерновка или укладка дерна «в клетку» Куски дерна вырезаются в виде квадратов с длиной ребра 25-40 см и толщиной 8-10 см, укладываются на заранее смоченный водой откос и прикрепляются деревянными или металлическими шпильками. Промежутки (швы) между кусками дернины заполняются растительным грунтом, а при укладке «в клетку» засеваются семенами тех же трав. Способ создания газонов с помощью дернины (рулонные газоны) нашел широкое применение в городских условиях там, где требуются скорейшие меры по озеленению и рекультивации земель, хотя он является более затратным.

Цветники – промежуточная форма между сплошными и локальными почвенными конструкциями. Для однолетних и двулетних культур по действующим Правилам должен быть сформирован рыхлый слой растительного почвогрунта от 25 до 40см (Постановления № 743-ПП, №623-ПП). Для многолетних растений этот норматив увеличивается до 40-60см. На самом деле обоснования таким нормам, по-видимому, не проводилось, по крайней мере, с гидрофизических позиций. Ведь транспирация, а следовательно и влагозапасы в почве под сплошной газонной растительностью должны быть не меньше, а скорее и больше по сравнению с декоративными цветковыми растениями с плотностью посадки от 2-4 экз/м^2 (крупные и средние многолетники) до 30-50 (70) экз/м^2 (однолетние и двулетние виды). Лишь почвопокровники (ковровые растения) высеваются с большей плотностью (100-200 экз/м^2) и образуют покрытие схожее с газонным, обладающее максимальными потребностями в потреблении влаги. Глубина высадки даже для крупных многолетних растений не превышает 10-20 см, так что и по этому показателю нет оснований считать требования цветковой растительности по отношению к почвенному ресурсу

выше, чем у газонной. Кроме того большинство используемых в городе растений для цветников обладают исходно мощными корневищами или луковицами, содержащими необходимый запас питательных элементов и влаги для начальных стадий прорастания и развития. Так что особенных отличий в подготовке конструктоземов под цветники и газоны по мощности аккумулятивного слоя по логике не должно быть.

Вместе с тем, исходя из физиологических и прежде всего транспирационных потребностей травянистых культур, слой рыхлых отложений, осваиваемый корневыми системами должен быть не меньше 40см. Данное положение следует, прежде всего, из анализа закономерностей природной организации почв под травянистой растительностью (рис. 1.15) и подтверждается численными экспериментами с моделями движения влаги и корневого водопотребления растений (см. сл. главы). Это не означает, что при создании городских конструктоземов надо формировать растительный слой такой мощности из привозной земли. Главное – обеспечить достаточную влагоемкость, проведя предварительное глубокое рыхление, а иногда и обработку структурообразующими почвмодификаторами слоя материнской породы (исходного субстрата) до нанесения на него привозного материала. В противном случае влага не поступает вглубь почвы, корни не в состоянии освоить необходимый им объем, и культурные растения теряют продуктивность и постепенно погибают от нехватки почвенного ресурса и влаги. Таким образом, и газоны и цветники должны быть обеспечены рыхлым почвенным ресурсом глубиной не менее 40см, если, конечно озеленение ориентируется на естественное увлажнение территории атмосферными осадками. Использование поливов позволяет вдвое-втрое снизить этот норматив и формировать конструктоземы на исходных уплотненных строительством грунтах с небольшим слоем привезенной растительной земли порядка 15-20см.

При приемке создания газонов и работ по их реконструкции (ремонту) должно уделяться первостепенное внимание соответствию толщины слоя растительного грунта принятым в городе нормативам, однако на практике в основном довольствуются лишь внешним видом газона (растительности) не обращая внимания на состояние и количество почвенного

ресурса. Этому косвенно способствует и система показателей оценки качества выполненных работ по озеленению, где вместо четких параметров растительного слоя прописана лишь планировка поверхности и рыхление на глубину не менее 10см, а также «выполнение рекомендаций по повышению плодородия». Не разработана система эффективных санкций за нарушение нормативов озеленения и подготовки почв к посадке растительности, что также не способствует прогрессу в данной области городского хозяйства. Противоречия и необоснованность в нормативной базе, отсутствие действенной системы контроля качества и привлечения к ответственности за допущенные нарушения не позволяют в настоящее время считать принимаемые Московским Правительством меры по улучшению состояния зеленых насаждений и комплексного благоустройства территорий г. Москвы достаточными и эффективными.

Одна из проблем нормативного характера – весьма жесткие и вместе с тем не всегда обоснованные требования к применяемым в озеленении почвенным материалам (почвогрунтам). Так в постановлениях «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве» «Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений», на которых базируется действующая в городе система сертификации «Экологичные почвогрунты» для всех видов озеленения (газоны, цветники, древесно-кустарниковая растительность) прописываются по сути идентичные требования к растительному слою с довольно узкими диапазонами по дисперсности (от супесчаного до среднесуглинистого), интервалами содержания органического вещества и весьма щадящими нормами загрязнения, соответствующими не ПДК, а ОДК для суглинков с нейтральной и щелочной реакцией среды. Варьирование в основном сводится к значительному обогащению этих почвогрунтом химическими удобрениями (NPK), часто в дозах, противоречащих федеральному законодательству в области качества почв (например высокое содержание минеральных форм азота и фосфора). В результате, фактически запрещенным (или не сертифицированным) становится использование при конструировании городских почв таких почвенных материалов как песок, щебень, торф, компосты и их разнообразных

композиций (например, торфопесчаных, песчано-компостных смесей, композиций с синтетическими почвомодификаторами типа СПГ), поскольку и по содержанию органического углерода и по дисперсности эти почвогрунты не будут соответствовать установленным нормативам.

Рассмотренные выше нормативные документы регламентируют также порядок формирования ***локальных почвенных конструкций.*** Наибольшие размеры посадочных ям, достигающие метра в глубину и около 9 $м^2$ по поверхности используются при посадке крупномеров с земляным комом. Такие посадки производятся чаще всего вне вегетационного сезона, когда почва вокруг дерева проморожена, и по весне его развитие и питание осуществляется за счет донорского почвенного ресурса извлеченного вместе с корнями из прежней среды обитания растения. Этот метод дает хорошую приживаемость взрослых особей растения при условии достаточного водоснабжения (частые осадки или дополнительный регулярный полив). Однако впоследствии крупномеры могут не развивать корневую поверхность, довольствуясь ресурсами земляного кома, что в засушливые годы приводит к повальной деградации и гибели дорогих посадок (фото 5 Приложения).

По сути дела никакой почвенной конструкции при таком способе посадки не создается, хотя в отдельных случаях действующими Правилами прописывается прокладка изолирующего грубодисперсного слоя «дренажа» на дне ямы при угрозе засоления противогололедными средствами от прилегающих дорог и тротуаров. Важно и ограничение по расстоянию от проезжей части до стволов древесной растительности (от 1,5-2 м для проездов и малых улиц до 5-7 м для магистралей общегородского значения), а также определение индивидуальной площади питания древесных пород, согласно Постановлениям № 743-ПП, №623-ПП. Последняя величина диктует плотность локальных насаждений или максимальные количества деревьев и кустарников в расчете на 1 га территории, которые варьируют от 120 до 300 экз (деревья) и от 800 до 1300 экз (кустарники) в зависимости от функциональной принадлежности той или иной территориальной зоны города. Такая плотность посадки вполне

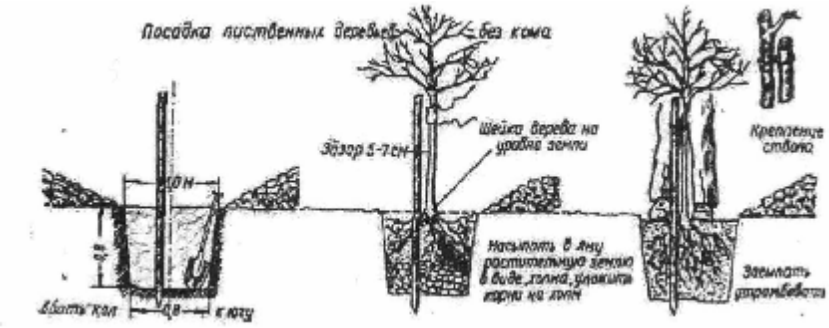


Рис. 1.18. Пример локальной почвенной конструкции при традиционном способе посадки древесной растительности в городских условиях.

соответствует научно-обоснованным нормам и подтверждается нашими расчетами по триггерным моделям роста древесных насаждений в зависимости от их водопотребления [Смагин, 2007]. Модельные расчеты на примере сосновых насаждений показывают, что расстояние между саженцами древесных пород не должно быть меньше 5–6м. При такой плотности на гектаре можно разместить до 300–400 особей. Более частое размещение допустимо лишь при посадке небольших растений с обязательным последующим прореживанием на стадии жердняка.

При посадке без кома подготавливаемые ямы и траншеи как правило имеют ширину: для молодых деревьев (0,8-1,2м), для взрослых деревьев (1,2-2,5м), для кустарников (0,7-0,8 м); глубина обычно ограничивается 0,6-0,8 м (рис. 1.18). Лиственные породы обычно высаживают осенью в промежуток времени от листопада до сильных заморозков или весной с момента оттаивания грунта до распускания почек. При осенней посадке растения можно пересаживать, не дожидаясь полного листопада, обрывая не опавшие листья. Корни высаживаемых деревьев укорачиваются так, чтобы поверхность среза была обращена вниз. Почву плодородного верхнего слоя или привезенный растительный грунт в объеме 0,3-0,6 м^3 помещают в нижнюю часть ямы в виде холма, на который впоследствии выкладывают корни растения (рис. 1.18). После установки

искусственного держателя (кол, металлическая штанга) или распорок, поддерживающих ствол в вертикальном состоянии, яма засыпается исходным или привезенным плодородным почвогрунтам и тщательно утрамбовывается. При посадке лунка обильно поливается ~25 л на дерево и 12 л на куст. Приствольный круг мульчируется органогенным материалом (торфяная крошка, опилки, хвоя, древесная щепа) или щебнем для снижения непродуктивных потерь влаги на испарение. Вокруг деревьев, высаживаемых на тротуарах оставляется без покрытия круг диаметром 1,5¬2,6 м, закрываемый деревянной или металлической решеткой. В условиях города растениям необходимо обеспечить послепосадочный уход, включающий в себя агротехнические мероприятия (регулярный полив, рыхление и мульчирование, внесение удобрений, стимуляторов роста, обработка против инфекций и вредителей), обеспечивающие приживаемость растений и создающие условия для их нормального роста и развития.

В завершении темы земледельческих и городских конструктоземов для выращивания зеленых насаждений, охарактеризуем вкратце авторские разработки для стран Персидского залива ***влагоаккумулятивных слоистых почвенных конструкций***, на базе научно-обоснованного проектирования с использованием закономерностей и моделей структурно-функциональной организации почв, согласно [Смагин и др., 99, 2008, 2009, Смагин, 2006, Smagin et al., 2005]. Основной технологический принцип конструкций – формирование системы отдельных функциональных слоев (горизонтов), имитирующих природную структурно-функциональную организацию почв. Каждый слой выполняет определенные специфичные функции, либо аккумулятивно-биоресурсные, либо защитные. При этом используются органические почвомодификаторы на основе природных (торф, компосты, биогумус, гуматы…) и синтетических (СПГ) биополимеров, а также местные грунтовые материалы разной дисперсности. В верхней корнеобитаемой зоне создаются один или два аккумулятивных слоя, запасающих необходимую для растений влагу и питательные элементы. С этой целью применяются либо в чистом виде, либо в композициях с исходным минеральным грунтом природные (торф),

модифицированные и синтетические (гидрогели) биополимеры. Нижняя часть отсекается от почвогрунта грубодисперсным экраном, который, прерывая капиллярную сплошность, способствует дополнительному подвешиванию влаги в корнеобитаемой толще и защищает ее от вторичного засоления и загрязнения водорастворимыми поллютантами с восходящими (возвратными) капиллярными токами влаги. Расчет количеств (доз) материалов, а также параметров конструкций (мощностей, глубины залегания слоев) производится на основе фундаментальной теории физического состояния почв с использованием современных компьютерных моделей энерго-массопереноса и структурно-функциональной организации почв как динамических биокосных систем [Смагин, 2003, 2006, Смагин и др., 2009]. Примеры и принципы подобного проектирования, а также основные результаты будут изложены в последующих главах.

Продолжая анализ разнообразных почвенных конструкций, согласно предложенной вначале раздела группировке, остановимся на специально возводимых конструктоземах для ***плоскостных спортивно-игровых сооружений*** (футбольные поля, теннисные корты, поля для гольфа и регби, ипподромы и др.). Их исследованию и проблеме конструирования посвящено множество публикаций как в нашей стране, так и за рубежом, в особенности в немецкоязычной литературе [Булгаков, 79, 87, Бутковский, Белобров и др., 2001, 2002 Adams, Jones, 79, Bauen mit Gruen, 89, Liesecke et al., 89, Baker, 90, Krupka, 92, Lehr , 97,Van Deventer, 2000, Matthias ,2002, Loesken, 2005, Sportrasenpflege, 2006]. Вместе с тем, следует отметить, что конструкции спортивных сооружений практически не изучались как полнопрофильные объекты, аналогичные почвам [Замотаев, 2009]. Основными подходами к изучению этих объектов являются следующие:

- Инженерно-биологический. Изучение ограничивается собственно «зеленым газоном» и, как следствие, составом травосмесей, устойчивостью растений к болезням и решению других; биологических проблем [Абрамашвили, 85, Bauen mit Gruen, 89,Matthias, 2002].

• Инженерно-геологический. Рассматривает почвенную конструкцию как «искусственные грунты» без подстилающих материнских горизонтов. Учитывается лишь гранулометрический состав остаточных почв, от которого непосредственно зависит мощность и характер слоев насыпной искусственной толщи [Булгаков, 79, 87, Холявко, Глоба-Михайленко, 80]

• Агрохимический. Состоит в анализе содержания питательных элементов NPK, pH и гумуса верхнего дернового горизонта. Данные используются для оценки периодичности подкормки травостоя норм внесения удобрений и пестицидов, а также разработки методов борьбы с вредителями болезнями газонных трав, ограниченно затрагивая проблемы конструирования почв [Baker, 90, Lehr , 97,Van Deventer, 2000, Matthias ,2002, Loesken, 2005, Sportrasenpflege, 2006].

В целом в настоящее время в нашей стране и за рубежом разработан научно-теоретический и прикладной аппарат по созданию спортивных газонов и уходу за ними, накоплен значительный опыт по мониторингу их состояния. Однако ни в одном из названных подходов конструкции не исследуются к полнопрофильное тело (почва), несмотря на очевидность такой методологии и ее доминирование при изучении естественных почв [Замотаев, 2009]. Технологическая схема почвенных конструкций под спортивно-игровыми сооружениями включает несколько искусственных минеральных слоев (от двух до пяти) и поверхностного плодородного слоя (рис. 1.19). Для футбольных полей на площади около 1 га на глубину 50-80 см срезаются верхние и отчасти срединные горизонты почв, образуя корытообразное ложе, на которое послойно укладываются минеральные и органоминеральные горизонты, которые в совокупности и формируют конструкцию, имитирующую почвенный профиль [Замотаев, 2009].

Под поверхностным органоминеральным горизонтом, если предусмотрено проектом, прокладываются трубы систем полива и подогрева. Для создания стока поверхностных вод территорию футбольного поля делают слегка выпуклой от центра к периферии – боковым бровкам, штрафным площадкам и воротам. Заключительная операция – посев многолетних трав или укладка готового газонного покрытия (рулона).

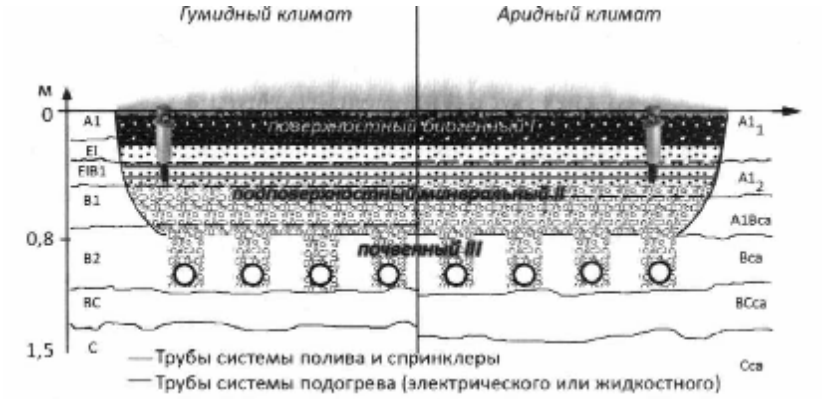


Рис. 1.19. Схема почвенной конструкции футбольных полей по [Замотаев, 2009].

Широкое применение при создании газонов в нашей стране получили злаки: рыхлокустовые (райграс многолетний), корневищно-рыхлокустовые (овсяница красная, мятлик луговой) и плотнокустовые (овсяница овечья).

Профиль искусственных субстратов конструкции в большинстве случаев состоит из нескольких слоев разной мощности, которые предлагается условно разделить на три горизонта (части) – биогенный поверхностный (I) и два минеральных – подповерхностный (П) и почвенный (Ш) (рис. 1.19). Биогенный слой состоит из 3-4 основных, перемешанных в разных пропорциях компонентов: гумусовых горизонтов естественных и пахотных почв, торфа (перегноя), песка и мелкой дресвы и/или мелкого гравия. Гранулометрический состав супесчано-легкосуглинистый, регламентирован и унифицирован по содержанию крупного песка и ила. Как правило, используются «почвы-доноры» разного гранулометрического состава. Оптимальный гранулометрический состав создается путем перемешивания органоминерального материала почв с крупнозернистым песком. В большинстве случаев он характеризуется слабокислой или нейтральной реакцией, содержанием гумуса 3-6%, повышенной обеспеченностью элементами питания [Абрамашвили, 85, Постановления № 623, №743 ПП].

Подповерхностный минеральный слой (II) формируется из насыпных материалов, имеющих разный гранулометрический состав, генезис и соотношение песка, дресвы, щебня, гальки, гравия, шлака, пемзошлака, керамзита, перлита, битого кирпича и т.д. Его функция, по мнению авторов подобных проектов, – отвод избыточных вод из поверхностного биогенного слоя. Размер фракций вниз по профилю нарастает, что по идее должно создавать благоприятные условия для эффективного дренажа. Мощность и количество слоев зависит от состава материала нижележащей свиты (III) и при более тяжелом составе увеличивается. На самом деле подобный грубодисперсный экран, разрывая капиллярную сплошность в профиле конструкции будет вернее всего не понижать, а повышать влажность вышележащего биогенного слоя (эффект «антидренажа» по [Смагин и др., 2008]). В результате поверхностный слой, обильно орошаемый влагой искусственных поливов и естественных осадков часто бывает переувлажнен и корни газона испытывают недостаток воздуха (кислородное голодание). Кроме того, чересчур влажный слой теряет свои технологические качества, в частности сопротивляемость механическим воздействиям со стороны игроков, создавая дискомфорт спортсменам и угрозу механического разрушения газона.

Почвенный минеральный слой (III) представлен погребенными генетическими горизонтами или почвообразующей породой исходной почвы. На глубинах около 60-80 см обычно формируют горизонтальный дренаж. Глубина и частота заложения дрен зависит от гранулометрического состава толщи (III). В более тяжелых по гранулометрическому составу субстратах дрены глубже, а сеть чаще. В супесчано-песчаных хорошо дренированных горизонтах дрены, как правило, вообще отсутствуют.

В совокупности все три слоя конструкции формируют достаточно сложное природно-антропогенное почвоподобное тело [Замотаев, 2009]. Его функциональные границы захватывают в том числе и природные субстраты в виде остаточных горизонтов почв, а внутренняя часть отличается многослойностью с контрастной текстурной дифференцированностью профиля. Поэтому часто транспорт

влаги и растворенных веществ, напрямую определяющий продуктивность газонов в такой конструкции сильно отличается от исходно запланированного проектом. И без предварительных проработок с использованием современных гидрофизических моделей подобные сложные объекты с учетом их дороговизны и значимости вообще бы не следовало проектировать методом «проб и ошибок».

Среди факторов, влияющих на устойчивость спортивных газонов наиболее значимыми являются механическая нагрузка, водно-воздушный и тепловой режимы и агрохимический прессинг. Механическое воздействие спортсменов во время тренировок и проведения соревнований на травяной покров и биогенный горизонт почвенной конструкции неминуемо ведет к их деградации. Важная особенность таких воздействий это их характерное время (длительность). В конце 60-х годов прошлого столетия продолжительность тренировочного процесса на стадионах страны составляла 186-246 часов за сезон. В последние годы интенсивность, количество и продолжительность тренировок резко возросли до 400 и более часов [Замотаев, 2009]. Так в цитируемой выше работе исследован режим тренировочного процесса на примере ТУСБ «Спартак» (п. Черкизово, Московская обл.) в 2005-2007 гг. и рассчитана фактическая месячная антропогенная нагрузка. По сравнению с оптимальной нагрузкой на газон, составляющей 25-30 часов в месяц, реальные данные показали превышение этой величины в 1,5-2,0 раза [Замотаев, 2009].

Значительное воздействие на конструкцию оказывают искусственные поливы. Отсутствие научно-обоснованных норм в определении данного режима часто приводит к сильному переполиву и переувлажнению биогенного слоя конструкции спортивных газонов. Так по данным [Замотаев, 2009] тренировочное поле клуба «Спартак» (Московская обл.) получает в результате полива дополнительно в течение года около 1500 мм, что превышает годовую норму более чем в два раза и сопоставимо с гумидными субтропиками и тропиками. Полив способствует активизации микробиологических и биохимических процессов выветривания и деструкции, создает благоприятные условия для миграции твердого вещества почв и выноса питательных веществ из органоминеральных

горизонтов. В биогенном слое, как уже отмечалось, повышенная влажность может приводить к неблагоприятным технологическим свойствам и недостаточной аэрации с учетом механического переуплотнения и низкой пористости, что в свою очередь угнетает рост газонных трав. Такая ситуация была зафиксирована нами при экспертной оценке состояния газона центрального стадиона «Динамо» в г. Москве (1998г), когда пористость аэрации биогенного корнеобитаемого слоя не превышала 6-10%, что близко к природным болотным экосистемам [Смагин, 2008].

Искусственное прогревание конструкции приводит к формированию в них специфического температурного режима, весьма отличного от микроклимата окружающих природных и сельскохозяйственных угодий [Замотаев, 2009]. Существенно (в 2-2,5 раза) увеличиваются суммы активных температур $T>10^{o}C$ практически по всему профилю конструктозема. При этом для глубин 25-60см отмечается температурная инверсия: сумма активных температур выше, чем в слое 0-5 см. Такое распределение температур с глубиной характерно для вулканических почв, например, периферии современных гидротермальных систем Камчатки [Карпачевский и др., 2009]. Подобный характер теплообеспеченности существенно влияет на почвенные процессы не только в поверхностном горизонте, но и во всем профиле ПТО. Высокие температуры почвенной среды приводят к ускорению выветривания минеральной массы, разложения, синтеза и минерализации растительных остатков и органического вещества. При этом увеличивается мобильный фонд доступных для растений элементов минерального питания, а также появляется возможность интродукции более теплолюбивых и устойчивых к механическим нагрузкам видов газонных трав из ассортимента аридных климатических условий (бермудская, суданская травы, паспалум гибрид). С другой стороны – повышение температур на фоне постоянных переполивов и хорошей дренированности почвенной конструкции приводит к быстрой минерализации и выносу за ее пределы элементов минерального питания, что в свою очередь требует их компенсации в виде минеральных удобрений. Однако в каких дозах производится подобная компенсация?

Азотные, калийные и комплексные удобрения вносят в твердой и растворенной формах, содержащих питательные элементы (NPK и микроэлементы). Дозы внесения азотных (карбамид, аммиачная селитра), калийных и комплексных удобрений (нитрофоска, азофоска, аммофоска, кемира газонная, кемира универсальная люкс, кемира весенняя, кемира осенняя и др.) на газоны спортивных полей в большинстве очень высокие и составляют от 1 до 3 т за сезон [Замотаев, 2009], что в 2-3 раза превышает потребность газонных трав даже при очень сильной антропогенной нагрузке. По данным этого автора на футбольное поле клуба «Спартак» в 2007 г за вегетационный период (180 дней) было внесено 2996 кг удобрений. Из них азотных – 950 кг, калиево-магниевых 400 кг, комплексных – 1600 кг, железного купороса – 16 кг. В пересчете на квадратный метр площади содержание N, P_2O_5, K_2O и MgO со внесенными удобрениями составляет соответственно 81,4, 38,9, 57,5 и 4 г/м^2, что в 2-4 раза выше и без того высоких рекомендуемых норм агрохимикатов для спортивных газонов [Постановления № 743-ПП, №623-ПП]. Отметим, что ежегодная нагрузка в 2-3 т/га минеральных солей для корнеобитаемого слоя 10-15 см мощности будет эквивалентна концентрации в 0,1-0,2% или 3-4 г/л твердого остатка и 4-6 дСм/м по критерию электропроводности почвенного раствора. То есть уже за один год при такой норме внесения реально достичь слабого и даже среднего уровня засоления, характерного для аридных регионов. В гумидном климате, как отмечалось вначале главы (§1.1), граница начала засоления и потери устойчивости роста и развития обычных культур это 2 дСм/м. Что же формируется в конструктоземе за десятилетние периоды подобного агрохимического прессинга? Даже с учетом возможного перераспределения солей, их выноса вглубь конструкции и экранирования грубодисперсными слоями от вторичного засоления при капиллярном поднятии влаги подобные «нормы» внесения электролитов будут губительны для растений, включая самые устойчивые виды газонных трав. По сути, технология выращивания спортивных газонов превратилась в аналог гидропоники, и собственно почва нужна лишь в качестве несущей поверхности и объекта размещения корней. Но для гидропоники свойственен точный расчет подачи элементов

питания в раствор в зависимости от потребностей растений на той или иной фазе их развития. Здесь же мы видим абсолютно необоснованное внесение огромных доз минеральных солей по принципу «чем больше – тем лучше», тогда как руководствоваться необходимо скорее правилом, что химические удобрения это своеобразный наркотик, а в больших дозах – яд для растений.

Из положительных технологических приемов, использующихся на спортивных полях отметим землевание и пескование. Периодическое (1-2 раза в год) внесение песка и песчано-почвенной или торфо-песчаной почвенной смеси в количествах соответственно 120 и 40 $м^3$ за вегетационный период является одним из способов выравнивания поверхности и улучшения несущего слоя газона. Поступающий материал меняет гранулометрический состав гумусового горизонта и одновременно обусловливает приращение почвенной конструкции вверх на 8-10 см за 70 лет, согласно [Замотаев, 2009]. Данный итог является весьма странным, поскольку ежегодное внесение 160 кубических метров минерального грунта (1,6 см/год) по логике уже за 10 лет должно привести к наращиванию мощности конструкции на 16 см, что почти вдвое выше указанной автором цифры за 70 лет. Возможно, здесь сказывается неточность определения границ с учетом проработки свежего минерального материала корнями растений, зоотурбаций (деятельность роющих животных, дождевых червей), механического перемешивания. Еще одно объяснение – нерегулярность проведения данного приема. Вероятен и некоторый механический снос минеральной массы грунта в перфорациях обуви игроков.

Заметим, что прием пескования (землевания) несколько напоминает вариант рассматриваемой выше покровной культуры для торфяных осушенных почв, хотя и при меньших почти на порядок разовых дозах внесения почвогрунта. Как и для многолетних трав в случае покровных культур и иных видов пескования на торфяниках, так и для сходной газонной растительности этот прием обеспечивает прибавку в урожайности (продуктивности) и увеличение устойчивости к внешним, в первую очередь механическим воздействиям со стороны техники или игроков спортивного поля. Прием, как

будет показано в следующих главах, приводит к снижению испарения, а главное – темпов деструкции органического вещества детрита в виде торфа или дернины газона. Все вместе позволяет рекомендовать его использование не только на спортивных площадках, но и на других видах муниципальных газонов, особенно сформированных на маломощных торфяных и торфяно-песчаных слоях «растительного грунта» примитивных конструктоземов. Необходимость такой меры ухода за газонами, а по сути – периодического наращивания почвенной конструкции, прописана и в действующих правилах ухода за зелеными насаждениями [Постановления № 623, №743 ПП].

В заключительной части главы перейдем от наиболее близких теме монографии вариантов конструктоземов для выращивания растительных культур к рассмотрению специальных или технических почвенных конструкций – ***геостабилизационных и почвенно-мелиоративных***. Геостабилизационные почвенные конструкции часто возводятся с использованием рассмотренных в предыдущем разделе геоматериалов и технических средств с целью закрепления почвенной поверхности, предотвращения водной и ветровой эрозии, осыпей, обвалов, просадок грунта и иных неблагоприятных изменений. Одним из наиболее эффективных способов укрепления откосов является использование ***габионных конструкций***, заполненных каменным материалом. Они эстетичны, хорошо вписываются в ландшафт и поддерживают развитие растительности. Чаще применяют коробчатые габионы размером 2х1х1; 1,5х1х1 м или габионы Джамбо размером 2х1х0,5, 3х2х0,5м, а также матрасы Рено, представляющие собой плоские прямоугольные конструкции сечением 3х2 м, толщиной 0,17, 0,23 и 0,3 м. Коробчатые габионы и матрасы Рено разделены на секции шириной 1 м с помощью диафрагм из той же металлической сетки, которые служат для упрочнения габиона и облегчения его монтажа. Материал крученой сетки – сталь, покрытая цинком или гальфано (сплавом цинка и алюминия с добавлением мишметалла). Гальфановое покрытие имеет большую коррозионную устойчивость, прочность, не трескается при изгибе и кручении.

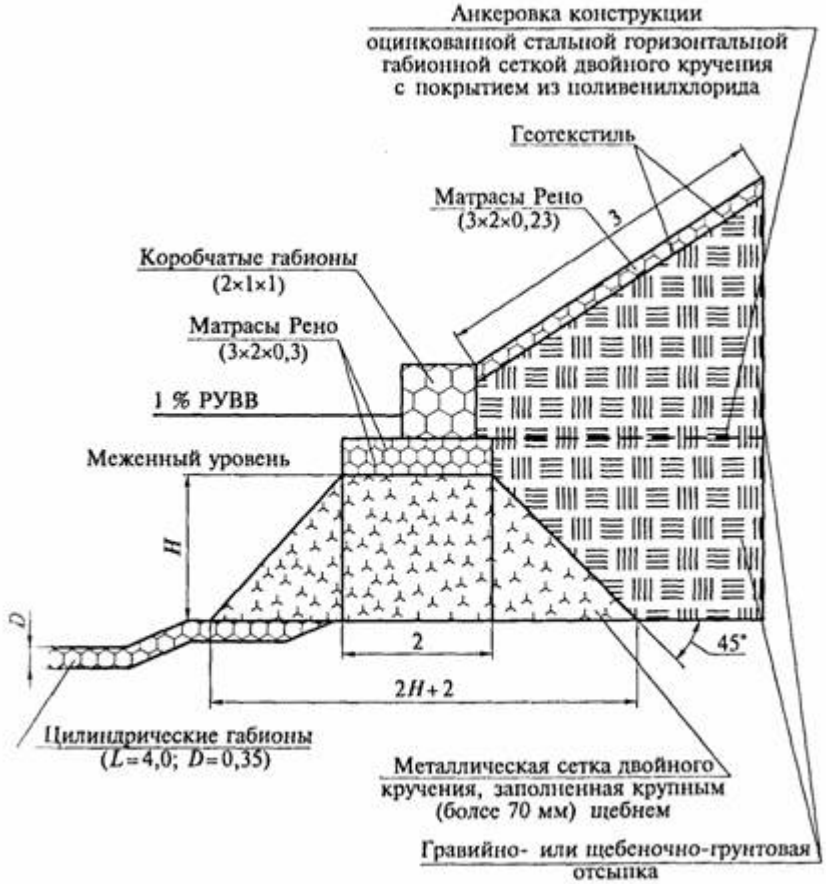


Рис. 1.20. Схема конструкции из габионов и геотекстиля для укрепления откосов по [Трофименко, Евгеньев, 2006]: L, D – длина и диаметр цилиндрического габиона, H – глубина междренного уровня, РУВВ – расчетный уровень верхних вод; все размеры – в метрах.

Конструкции габионов, как уже отмечалось, отличаются гибкостью, прочностью, водопроницаемотью, долговечностью, способностью аккумулировать грунтовые частицы, низкой стоимостью. Коробчатые габионы и габионы Джамбо используют для возведения подпорных стен, береговых укреплений, водосливных плотин. Лицевая грань таких

сооружений может быть гладкой или ступенчатой, максимальная высота 7-8м. Матрасы Рено, применяемые для площадных покрытий (на склонах для защиты от эрозии, а также в качестве основания для сооружения коробчатых габионов), выполняют функции защитного фартука, предохраняющего основание конструкции от размыва. Цилиндрические габионы используют при создании подводных фундаментов габионных сооружений и при аварийных работах на акваториях. После возведения габионного сооружения его открытая пористость составляет примерно 30%. С течением времени поры заполняют частицами грунта, и через несколько лет происходит консолидация сооружения – оно приобретает максимальную устойчивость. На рисунке 1.20 приведена схема одной из возможных конструкции на основе габионов различной формы и геотекстиля, использующаяся для укрепления откосов и обочин в автодорожном деле, при строительстве железнодорожных сооружений, мостов и укреплении береговой линии.

Преимущества сооружений из габионов и матрасов Рено по сравнению с традиционными жесткими и полужесткими конструкциями следующие [Трофименко, Евгеньев, 2006]:

- Гибкость. Габионные структуры поглощают возможные осадки грунта без разрушения самого сооружения;
- Прочность. Металлическая сетка двойного кручения выдерживает переменную разрывную нагрузку 35-50 кН, что позволяет воспринимать значительные нагрузки (эрозионные, волновые, ледовые, давление грунтовых масс и др.) без разрушения. Этому способствует сочетание гибкости конструкции с прочными структурными связями внутри нее, превращающими конструкцию в единое целое;
- Длительный срок службы. Прочность и устойчивость габионных конструкций увеличиваются с годами, так как со временем происходит уплотнение наносов и грунта в пустотах габионов и начинается рост растительности. При правильном проектировании срок службы сооружений практически не ограничен. Срок службы стальной проволоки, покрытой гальфаном и пластиком даже в агрессивной среде превышает 100 лет;

• Экономичность. Данное свойство обеспечивается более низкими ценами на строительные материалы, отсутствием необходимости использования специальных дренажных устройств, использованием геотекстиля вместо песчано-гравийных фильтров, незначительным объемом работ по подготовке основания габионных сооружений, меньшими затратами на заработную плату строительных рабочих, использованием обычной строительной техники, меньшими расходами на эксплуатацию и ремонт сооружений

• Экологичность. Для сохранения экологического баланса территории важным является беспрепятственная фильтрация вод через габионные конструкции. Экологичность определяется высокой водопроницаемостью и способностью аккумулировать грунтовые частицы, что, способствует развитию подводной флоры и фауны. Габионы хорошо вписываются в окружающий ландшафт и тем самым увеличивают его эстетическую ценность.

Для создания плодородных слоев в специальных технических конструкциях, которые могли бы осваиваться растительностью применябтся различные варианты ***биоматов и биотекстилей***. Биоматы изготавливают в виде рулонов (длиной 50 м и шириной 2,4 м), которые раскатываются по склону. Верхнюю часть биоматов закрепляют кольями или засыпают грунтом. Еще до установки биоматы засевают семенами трав, наиболее приспособленных для конкретного участка местности, что улучшает эстетическое восприятие ландшафта. Биотекстили – сплетенные из натурального (чаще всего кокосового) волокна сетки с размером ячеек 5-6 мм способствуют быстрому укоренению растительности и применяются для стабилизации склонов, укрепления стенок и днища водоотливных лотков.

В современных геостабилизационных конструкциях чаще всего используется органичное сочетание вышеперечисленных материалов и технологий – каменистых габионов, гео- и биотекстилей, биоматов, наряду с использованием местных материалов в виде почвогрунтов, щебня, природного камня и приемами закрепления растительностью. Вариант подобной системы под коммерческим названием «Зеленый Террамеш» для защиты откосов от эрозии приведен на иллюстрации 1.21. В этой конструкции лицевая грань выполнена из коробчатых

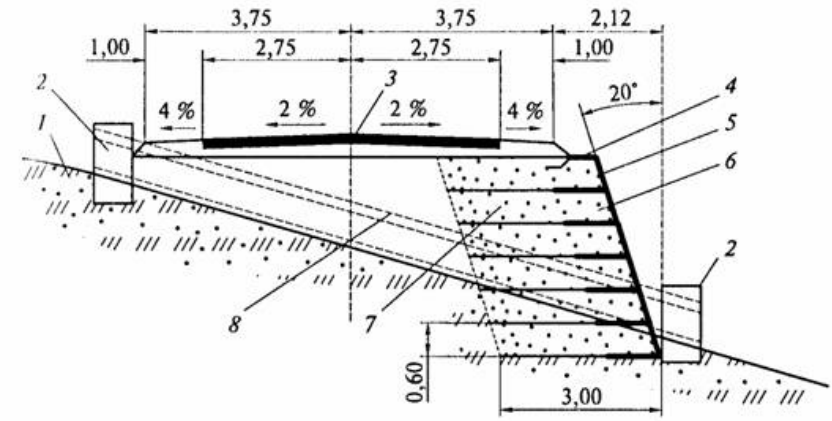


Рис. 1.21. Схема геостабилизационной конструкции «Зеленый Террамеш» смешанного типа для укрепления и озеленения откосов по [Трофименко, Евгеньев, 2006]: 1– грунт, 2 – железобетонные подпорные элементы откоса, 3 – дорожное покрытие, 4 – металлическая сетка габионов, 5 – геосинтетика, 6 – биоматы из кокосового волокна, 7 – уплотненная грунтовая засыпка, 8 – стальная стяжка; размеры даны в метрах, в процентах указан поперечный уклон.

габионов. Армирующие панели, изготовленные из сетки двойного кручения, закладываются в грунт насыпи, который принудительно утрамбовывается до предельных значений плотности 1,6-1,7 г/см^3, свойственных, согласно [Гаель, Смирнова, 99] наиболее компактной гексагональной упаковке частиц грунта. Лицевую грань конструкции выполняют из такой же сетки. С ее внутренней стороны устанавливают кокосовые биоматы, отделяющие сетку от грунта обратной засыпки. Под биоматы закладывают плодородный растительный почвогрунт. Конструкцию чаще всего возводят под углом 60-70^o. Обработка лицевой поверхности гидропосевом позволяет в сжатые сроки озеленить поверхности откосов.

В большинстве геостабилизационных конструкций используются различные варианты ***геотекстилей*** как для изоляционных покрытий почвогрунтов, так и для выполнения объемных фигур (обойм, полуобойм) с грунтовым заполнением.

Сооружение насыпи с геотекстильными прослойками включает в себя следующие операции: подготовка основания, раскатка и выравнивание рулонов по поверхности основания или насыпного слоя почвогрунта, скрепление полотнищ между собой, отсыпка земляного полотна до проектных отметок. Перед укладкой геотекстиля в летний период на естественное основание необходимо предварительно засыпать грунтом глубокие ямы или старые колеи на дорожной полосе, удалить кустарник и отдельные деревья без корчевания пней. В зимний период геотекстиль следует укладывать после промерзания грунта основания на глубину 0,30-0,40 м. Снежный покров толщиной более 0,2 м должен быть удален с основания насыпи. Если предусматривают укладку геотекстиля на ранее отсыпанный слой земляного полотна, то его поверхность должна быть спланирована с поперечным уклоном 4 %.

Направление раскатки рулонов (вдоль или поперек дороги) зависит от особенностей работы конструкции. Рулоны необходимо раскатывать с максимально возможным натяжением, устраняя перекосы и выравнивая края. Уложенное геотекстильное полотно закрепляют (пригружают) комьями грунта или пришпиливают металлическими (пластмассовыми) скобами, вдавливаемыми ручным кассетным приспособлением.

Для устройства обойм и полуобойм из геотекстильного полотна рулоны раскатывают в поперечном направлении с запасом по обеим сторонам насыпи, достаточным для смыкания краев в верхней части обоймы или для образования верхних ветвей полуобоймы. После отсыпки грунтового слоя до заданного уровня с послойным разравниванием и уплотнением свободные края полотен заводят на его поверхность с максимальным натяжением. При использовании полотен шириной не менее 4 м и скреплении их между собой допускается раскатывать рулоны в продольном направлении с таким расчетом, чтобы продольные стыки полотен, образующих ограждающие части обоймы или полуобоймы, располагались внутри насыпи не ближе 1 м к ее откосам. Геотекстильный материал засыпают способом «от себя» слоем грунта, с минимальной толщиной от 0,15 (откос) до 0,5 м (обойма, полуобойма) и минимальной шириной нахлеста от 0,1 (под

гравием) до 0,2-0,3 м (в обойме, полуобойме или грунтовом теле насыпи) [Трофименко, Евгеньев, 2006].

При выборе способа скрепления следует учитывать возможность изменения свойств геотекстильного материала в зоне стыка. При сварке ухудшается водопроницаемость полотна, поэтому сварка не годится для соединения полотен, выполняющих дренажную функцию, например под сборным цементобетонным покрытием. Для защиты от солнечного излучения и атмосферных осадков геотекстильного материала, уложенного на поверхность неподтопляемых откосов, устраивают грунтовое покрытие (экраны) из песка, гравийно-песчаной смеси, торфо-песчаных смесей и иных природных почвенных материалов.

Широкое распространение в последние десятилетия получили искусственные почвенно-грунтовые конструкции с использованием ***георешеток.*** Большинство минеральных материалов и грунтов, применяемых для строительства дорожных одежд и фундаментов на объектах гражданского и промышленного строительства, являются недостаточно устойчивыми по своей природе и подвержены в процессе эксплуатации различного вида деформациям. Это обусловлено их структурой, представляющей собой смесь дискретных частиц разных конфигураций и размеров, способных перемещаться относительно друг друга под действием нагрузок. При применении слабосвязанных минеральных материалов в поверхностных покрытиях всегда возникает проблема повышения устойчивости к нагрузкам и сопротивления сдвигу. В ряде случаев она решается введением в композицию органических и неорганических вяжущих; в качестве несвязных минеральных материалов применяют в основном пески, щебень, гравий. Дорожные покрытия из таких материалов обладают недостаточным сопротивлением нагрузкам от транспортных средств, особенно вблизи поверхности и подвержены образованию колеи.

В начале 70-х годов специальная лаборатория Инженерных Войск США начала разработку методов скоростного строительства дорог с использованием песка на побережьях и в пустынях, пытаясь найти альтернативу применению химических и иных связывающих компонентов.

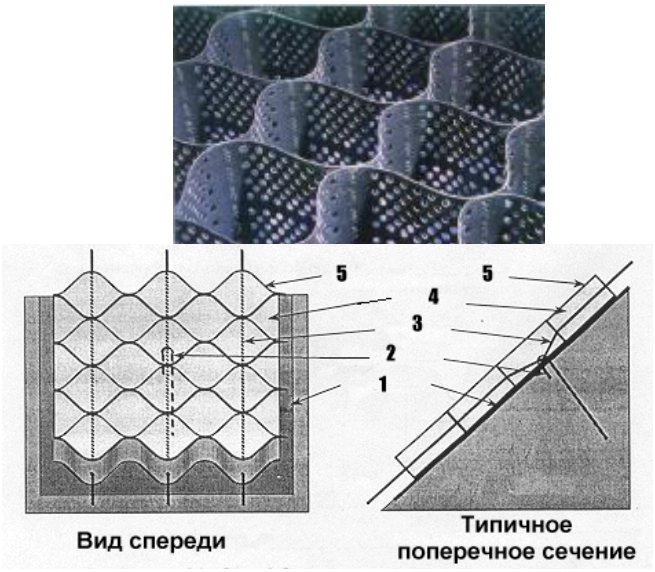


Рис. 1.22. Система укрепления откоса «ГЕОВЕБ» - главные компоненты (по материалам сайта http://www.presto.ru/):фото сверху – решетка с перфорированными стенками; схема конструкции – 1– геотекстиль, 2 – J-образный анкер, 3 – арматурный трос, 4 – заполнитель, 5– георешетка.

Многочисленные испытания и эксперименты позволили найти такую альтернативу, которой стала трехмерная ячеистая конструкция ограничения несвязных материалов-заполнителей.

На основе этих исследований фирма PPC (Presto Product Company) разработала ***сотовую георешетку*** «ГЕОВЕБ», обеспечивающую необходимую устойчивость несвязных минеральных материалов. Было выявлено, что оптимальное отношение глубины ячейки к условному диаметру площади нагрузки, должно быть равно 1:1 для тяжелых колесных нагрузок.

Система «ГЕОВЕБ» представляет собой комплект полиэтиленовых листовых полос, соединенных серией смещенных сварных (ультразвуком) швов на всю глубину ячейки (рис. 1.22). Линия шва расположена перпендикулярно продольной оси полосы. В развернутом виде эти полосы образуют стенки ячеистой конструкции, которую заполняют тем

или иным минеральным заполнителем. Глубина ячеек может быть различной, в зависимости от расчетных критериев нагрузки и структуры материалов-заполнителей. Последними разработками фирмы PRESTO являются текстурирование и перфорирование стенок ячеек, позволяющее усилить трение внутри ячейки и создать новые возможности дренирования дорожных одежд. Стандартные секции «ГЕОВЕБ» имеют следующие размеры 3350х203х130мм в сложенном для транспортировки виде и 6100х244х203 мм в разложенном виде.

Материал и технологию «ГЕОВЕБ» применяют при строительстве следующих конструктивных элементов и сооружений:

- дорожные покрытия из зернистых материалов;
- слои оснований дорожных одежд;
- функциональные площадки различного назначения (автостоянки, площадки складирования и перегрузки и т.п.);
- покрытия площадок (стоянок, игровых площадок и др.) с травянистым верхним слоем;
- укрепление откосов земляного полотна автомобильных и железных дорог;
- причалы для морских и речных судов;
- фундаменты для подпорных стенок с уширенной пятой;
- подушки фундаментов мелкого заложения;
- укрепление оснований и стенок водопропускных каналов, водотоков, траншей.

Георешетка «ГЕОВЕБ» существенно изменяет эксплутационные характеристики зернистых материалов-заполнителей. Происходит изменение напряженно-деформированного состояния заполнителя за счет стенок ячеек, которые ограничивают горизонтальные перемещения частиц. По сравнению с рулонными армирующими материалами, жесткость пространственной сотовой решетки «ГЕОВЕБ» значительно выше, что позволяет на несколько порядков уменьшить остаточные деформации от прилагаемых нагрузок. Георешетка значительно увеличивает также сопротивление сдвигу зернистых заполнителей, что позволяет, с одной стороны, использовать в качестве заполнителей местные материалы

низкого качества, с другой стороны, отказаться от дорогостоящих вяжущих материалов – цемента или битума. Применение материала и технологии «ГЕОВЕБ» позволяет уменьшить общую толщину дорожной одежды за счет повышения модуля упругости дискретных материалов, помещенных в георешетку, а также путем устройства дорожных одежд переходного типа на нестабильном земляном полотне до завершения его стабилизации.

При использовании местных грунтов в качестве покрытия сопротивление сдвигу приобретает особое значение. Георешетка позволяет значительно увеличить эту характеристику местных некачественных грунтов, что дает выигрыш по стоимости в сравнении с привозными материалами более высокого качества. Конструкция уменьшает горизонтальное выпирание материалов верхних слоев и колееобразование, а также истирание и износ.

Технология «ГЕОВЕБ» позволяет использовать при невысокой интенсивности движения, например, на автостоянках или дорожках в парках в качестве верхнего слоя растительные грунты с травянистым покрытием без повреждения этого слоя в результате эксплуатации. Применение пористых материалов в качестве заполнителей перфорированных ячеек решетки способствует водоотводу.

Специфика укрепления откосов с помощью георешеток заключается в следующем. Эффективность защиты откосов возрастает, когда материалы конструкции укрепления находятся в тесном контакте с грунтами откоса (склона). Следовательно, профилирование откоса перед укладкой системы защиты должно обеспечить удаление всех выступов и заполнение всех пустот. Резкие переломы профиля должны быть скруглены как по бровке откоса, так и по промежуточным бермам. На профилированный склон укладывают ***геотекстиль***. Геотекстильные подстилающие слои в системе ГЕОВЕБ® для защиты откосов выполняют ряд функций: фильтрация, плоскостной дренаж и армирование земляного полотна. Кроме того, нетканый геотекстиль является своего рода арматурой для корневой системы растений. Рулоны геотекстиля обычно раскатываются от бровки откоса к его подошве. Засыпка верхней кромки геотекстиля в выкопанной заранее траншее на бровке предотвращает проникание поверхностных вод под

конструкцию укрепления откоса. Между смежными секциями геотекстиля следует обеспечить нахлест и поддерживать его путем установки в шве штырей или скоб вниз по откосу. В последние годы значительно расширилось применение подпорных стен при строительстве дорог в связи с том, что реконструкцию дорог все чаще приходится производить в пределах существующей полосы отвода, поскольку прилегающая территория застроена. При необходимости откосы насыпей заменяют подпорными стенами.

Следует отметить, что применение геомембранного или геотекстильного прослоя на откосе может сделать неустойчивым защитный слой укрепления вследствие относительно низкого коэффициента трения, которым обладают многие геосинтетические материалы. Устойчивость может понизиться в еще большей степени, если материал укрепления является водонасыщенным, подвергается ударам волн и воздействию гидростатических подъемных сил или перегружен из-за наличия снежной нагрузки.

Устойчивость конструкции укрепления зависит от ее закрепления у подошвы откоса. Размыв в нижних частях откоса может вызвать сдвиг и разрушение конструкции укрепления. Аналогичным образом, укрепление бровки откоса может обеспечить защиту верхней части длительно подтопляемого откоса. Устойчивость работающей как единое целое гибкой конструкции защиты откоса может быть обеспечена с помощью установки анкеров на бровке откоса вместо традиционной опоры в подошве. Это эффективно в случаях, когда требуется защита только верхней части подтопляемого откоса. Неудовлетворительное укрепление бровки откоса может привести к общей потере устойчивости конструкции укрепления откоса. На крутых откосах заполнение растительным грунтом обычно следует выполнять сверху вниз. Следует избегать чрезмерного заполнения ячеек и укладки в них крупных комьев грунта. Рекомендуется утрамбовывать заполнитель для уменьшения воздушных пустот. Все ячейки должны быть полностью заполнены после легкого утрамбовывания заполнителя. Чрезмерное уплотнение заполнителя может замедлить процесс развития растительности. Сразу же после укладки материала, заполняющего ячейки, необходимо

произвести посев и уложить временные противоэрозийные экраны (покрытия). В зависимости от условий строительства в качестве заполнителей георешеток могут быть применены различные материалов, в число которых входят следующие: почвенный грунт с растительностью, торфопесчаная смесь, минеральные материалы – гравий или щебень, комбинации вышеуказанных материалов в соответствии с условиями строительства.

Стенки георешеток, содержащих заполнитель из растительного грунта, образуют серию защитных перемычек, простирающихся по всему защищаемому откосу. Развитие обычной струйной эрозии, имеющей место в случаях, когда концентрированный поток врезается в грунт, предотвращается, поскольку поток непрерывно перенаправляется к поверхности. Этот механизм также снижает скорость потока и, соответственно, эрозионное воздействие стока. Слой растительного грунта определенной толщины и развивающаяся корневая система растений защищены внутри каждой ячейки. Корни легко проникают через нетканый слой геотекстиля в подстилающий грунт, таким образом создавая единую конструкцию укрепления по всей поверхности откоса. В засушливых регионах георешетки могут улучшить развитие местной растительности благодаря удержанию значительного количества влаги в грунте вблизи поверхности.

Заполнитель из растительного грунта рекомендуется в случаях, когда поверхностные потоки являются прерывистыми, средней интенсивности и относительно короткой длительности (менее 24 часов). Пиковые скорости, равные 6 м/сек, могут выдерживаться в течение коротких периодов времени, когда растительный покров достаточно хорошо развит.

Временные противоэрозионные экраны следует применять для того, чтобы защитить растительный грунт и семена сразу после посева и способствовать быстрому формированию растительности. Для улучшения эксплуатации рекомендуется применять легкий, 150-200 г/м^2, иглопробивной нетканый геотекстиль. При выборе ***размера ячейки*** георешетки наиболее важными факторами являются крутизна откоса, интенсивность поверхностного стока (частота и продолжительность ливней) и угол естественного откоса

материала – заполнителя. Приведенные ниже рекомендации по размеру ячеек сделаны, исходя из допущения, что растительный покров полностью сформируется прежде чем начнется воздействие расчетного стока поверхностных вод. Решетки с крупной ячейкой обычно применяют в случаях, когда угол откоса составляет менее 30° и когда прогнозируется умеренная интенсивность стока. Для откосов круче 30° или откосов, подвергающихся воздействию сосредоточенного потока, требуется применение решеток со стандартной ячейкой. Обычная глубина ячеек для заполнения растительным грунтом составляет 75 мм при условии, что в грунте откоса будет развиваться корневая система и угол откоса составляет менее 30°. Для откосов круче 30° требуется ячейка глубиной не менее 100 мм. Зависимость между геометрическими характеристиками ячейки с заполнителем может быть выражена следующим образом [PRESTO…85-95]:

$$f = b - \arctan\left(\frac{d - de}{L}\right); \qquad d = L\tan(b - f) + d_e$$

где f – минимальный угол естественного откоса материала заполнителя, b –угол откоса, d – глубина ячейки (мм), L – длина ячейки (мм), d_e – минимальная толщина материала заполнения (мм) (рис. 1.31). Рекомендуемое минимальное значение de составляет 25 мм. Длина и глубина ячейки, исходя из допустимого значения de, равного 25 мм, могут быть определены с помощью номограммы на рисунке 1.23.

Для закрепления решеток на откосе используется анкеровка. Типовая анкеровка георешетки на поверхности откосов включает 3-5 арматурных тросов на секцию «ГЕОВЕБ» шириной 2,44 м, проходящие вниз по откосу, и 460-мм J-образные анкерные штыри, расположенные с интервалами 1000 мм вдоль каждого троса. Преимущества технологий закрепления и озеленения откосов с использованием георешеток очевидны из следующих соображений. Гравий и щебень могут обеспечить эффективную защиту откоса при условии, что угол откоса меньше, чем угол естественного откоса материала заполнителя. Необходимо обеспечить защиту подошвы откоса от размыва. Концентрированный сток поверхностных вод может привести к образованию размывов в

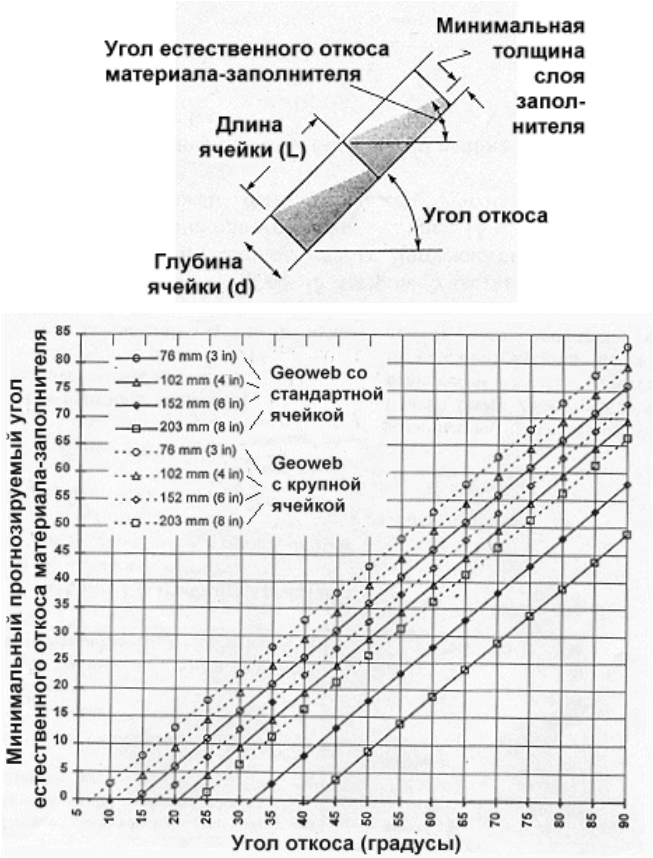


Рис. 1.23. Выбор размера ячейки решеток «ГЕОВЕВ» для соотношений крутизны откосов обваловки и углов естественного откоса материалов – заполнителей (по материалам [PRESTO…85-95]).

материале заполнителя, если гидродинамические усилия являются достаточно высокими. Способность георешетки удерживать рыхлый материала в ячейках позволяет использовать этом материал на более крутых откосах, чем это было бы возможно без ее применения. Угол откоса может превышать угол естественного откоса материала – заполнителя в случаях, когда полное заполнение ячеек не является обязательным. Для различных соотношений заложений откосов

и углов естественного откоса материалов-заполнителей при помощи приведенных выше формулы или номограммы на рис. 1.23 можно подобрать требуемые размеры георешетки. Конструкция укрепления с заполнителем из минерального материала может выдержать воздействие более интенсивного потока поверхностных вод, чем укрепление из минерального материала, не помещенного в георешетку. Сопротивление эрозии георешетки с заполнением из минерального материала может быть повышено без потери присущей данной конструкции гибкости и устойчивости. Вместе с тем для устойчивого функционирования растительного покрова на основе почвенных конструкций с георешетками чрезвычайно важно рассчитать объем наполнителя и подстилающих почвогрунтов для обеспечения требуемого запаса влаги. В противном случае, как уже отмечалось ранее, травянистая растительность на таких конструкциях необратимо увядает в засушливые сезоны и покрытие перестает функционировать как почвенная конструкция (рис. 1.17, фото 4).

Специальные ***изоляционные почвенные конструкции*** используются при захоронении вредных веществ, отходов и в частности при рекультивация и обустройстве полигонов ТБО (рис. 1.24). Современная тенденция развития строения полигонов предусматривает в основном увеличение удельной нагрузки на единицу площади, которая позволяет максимально использовать участки, отведенные под складирование ТБО. Это достигается путем увеличения степени уплотнения складируемых отходов и высоты складирования. Практика показывает, что современные грунтоуплотняющие катки позволяют уплотнить ТБО на полигонах до равновесной плотности 0,8 г/см^3, близкой к таковой в хорошо разложившимся торфянике или рыхлом минеральном грунте. Высота складируемых ТБО на ряде зарубежных полигонов достигает 60м. Конструкция ***защитных экранов*** на мусорных полигонах – это комбинация изоляционных и фильтрующих элементов, позволяющих собирать и отводить водные растворы ТБО и конденсат, а также обеспечивать изоляцию тела полигона от подпитки грунтовыми водами и атмосферными осадками путем сброса в дренажную сеть. Не менее важной, чем гидроизоляция, является функция защиты от газовых эмиссий,

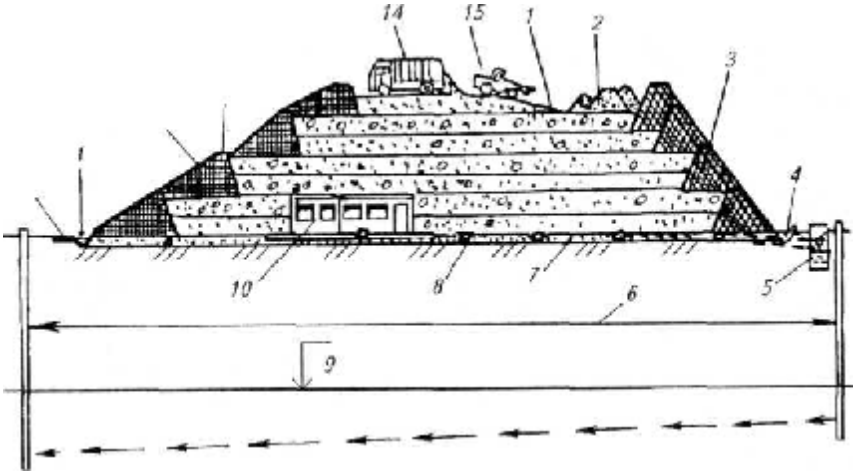


Рис. 1.24. Конструкция полигона по обезвреживанию и захоронению ТБО (по [Сметанин, 2000]): 1 – ТБО, захораниваемые в тело полигона; 2 – минеральный грунт для устройства поярусной промежуточной санитарной изоляции отходов; 3, 12 – дамбы обвалования, выполняемые из минерального грунта; 4 – водоотводная канава; 5–емкость для сбора фильтрата; 6–наблюдательные скважины; 7– пластовый дренаж; 8– дрены; 9 – УГВ (стрелками указано направление движения грунтовых вод); 10– весовая для взвешивания машин; 11 – автомобильная дорога; 13 – бермы; 14– мусоровоз; 15 –грунтоуплотняющая машина.

и в частности – метана, образующегося в теле полигона при анаэробной деструкции органических компонентов ТБО. Защитные экраны выполняют из комбинации природных материалов (песка, гравия, щебня, глины, бентонита и их смесей) в сочетании с геосинтетическими материалами (синтетической рулонной изоляцией, геомембранами, геотекстилями, бентонитовыми матами и другими геокомпозитами). Схемы защитных экранов, применяемых в полигоностроении ряда европейских стран, приведены на рисунке 1.25. При заглублении днища полигона ниже естественной поверхности земли основание его располагают на 0,5-1 м выше уровня грунтовых вод. После завершения строительства полигона наступает период его эксплуатации,

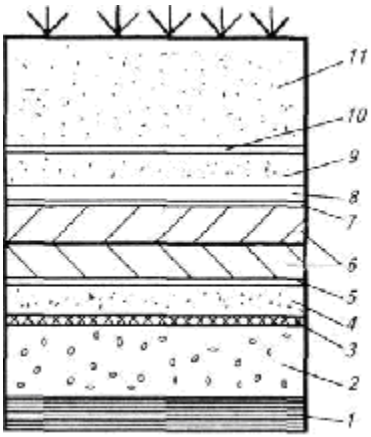


Рис. 1.25. Схема конструкции защитно-изоляционного слоя поверхности полигона ТБО (по [Сметанин, 2000]): 1– верхний слой свалочного грунта полигона, 2– выравнивающий слой, 3 – геотекстиль как выравнивающий элемент, 4– слой газового дренажа не менее 0,3 м, 5 – геосинтетический материал как разделительный или армирующий элемент, 6– уплотненный глинистый грунт, укладываемый послойно по 0,25 м, 7 – синтетический рулонный гидрогазоизоляционный материал (геомембрана), 8 – геотекстиль как защитная система для синтетической гидрогазоизоляции, 9 – дренажный слой от 0,3 м и более, диаметр частиц 16-32 мм, 10– геотекстиль в качестве фильтра и разделяющего слоя, 11 – слой потенциально плодородного почвогрунта 0,6-1 м.

заключающийся в производстве работ по его заполнению отходами, которые отсыпают в организованном порядке послойно. Толщину их обычно принимают от 2 до 2,5 м каждый. В связи с этим отсыпаемые слои отходов максимально уплотняют грунтоуплотняющими катками, а в конце рабочего дня их изолируют слоем минерального грунта (рис. 1.24).

Учитывая недостаточную прочность отходов, уложенных в тело полигона, при формировании высоконагружаемых полигонов с целью обеспечения общей их устойчивости перед заполнением отходами каждого яруса по их периметру предварительно отсыпают дамбы обвалования из минерального

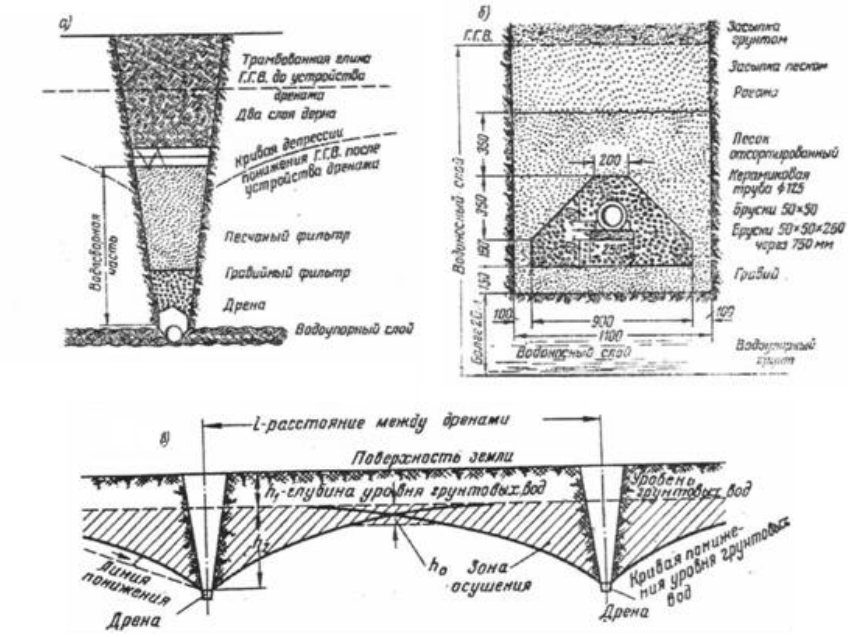


Рис. 1.26. Схемы конструкций различного вида дренажей, использующихся в городских условиях: а) на водоупоре; б) «висячий» (несовершенный) дренаж над водооупором; в) – теоретическая депрессионная кривая для расчета междренных расстояний (см. текст).

грунта. Полигон формируют в форме отвала с крутизной внешних откосов (уклонами) не менее 2-4 и устройством на них берм шириной не менее 3 м через каждые 5-10 м по высоте полигона (рис. 1.24).

Распространенным видом ***инженерных почвенно-мелиоративных конструкций*** является ***дренаж*** [Зайдельман, 87] (рис. 1.26). В конструктивном отношении дренажи бывают горизонтальными, вертикальными и комбинированными. Горизонтальный дренаж состоит из дренажных труб, уложенных ниже уровня грунтовых вод, с уклоном, обеспечивающим отвод дренируемых вод. Для предупреждения механического выноса частиц грунта (суффозия) дренажные трубы окружают песчано-гравелистым фильтром. Вертикальный дренаж состоит из вертикальных трубчатых или шахтных

колодцев, погруженных в водоносный слой. Воду из колодцев откачивают насосами. Комбинированный дренаж – сочетание горизонтального и вертикального; вертикальные трубчатые колодцы при соединяют к коллектору, уложенному с уклоном. Грунтовые воды из колодцев поступают самоизливом в коллектор. При этом часть грунтовых вод может перехватываться также горизонтальным коллектором. Для осмотра закрытой дренажной сети устраиваются смотровые колодцы на расстоянии 30¬40 м один от другого и во всех местах присоединения. Дренажную сеть всегда желательно трассировать нормально к направлению грунтового потока. Для осушения отдельных пониженных мест городской территории необходимо одновременно с устройством дренажа упорядочить отвод поверхностных вод путем вертикальной планировки. Дренажи должны закладываться ниже глубины промерзания грунтов, характерной для данной местности.

В зависимости от материалов, использующихся для формирования дрен, различают гончарный, пластмассовый, каменный, фашинный и ряд других видов дренажа, из которых в условиях мегаполиса наиболее целесообразным следует принять дренаж из пластмассовых материалов асбоцементные труб или каменной (щебенчатой) засыпки. Наиболее технологичными в укладке являются пластмассовые или асбоцементные трубы длиной 2 м, соединяющиеся при помощи муфт. Для приема воды в трубах делаются отверстия диаметром 8-12 мм. Во избежание их заиления и закупоривания тонкодисперсным почвогрунтом трубы часто оборачивают фильтрующими материалами в виде кокосового волокна или синтетического геотекстиля. Дренирующая засыпка вокруг дрен состоит из двух или трехслойного фильтра. В последнее время наряду с естественными минеральными грунтами для создания подобных фильтров стали активно применять геосинтетические материалы и конструкции (см. выше).

В условиях городской застройки применяют следующие основные ***системы дренажей***: систематический, головной, кольцевой или различные их комбинации Систематический дренаж состоит из системы труб (осушителей), которые расположены равномерно по осушаемой территории. Они предназначены для понижения уровня грунтовых вод на

участках между дренами. Осушители примыкают к трубам-собирателям, которые транспортируют дренажные воды к главному городского горизонтального магистральному коллектору. Из главного коллектора вода самотеком или путем перекачки сбрасывается в водоприемник. Величина начального заглубления дрен зависит от принятой нормы осушения.

Головной дренаж состоит из осушителя-коллектора, располагаемого на верхней границе дренируемой территории, и служит для перехвата грунтового потока, притекающего со стороны водораздела. Головной дренаж особенно эффективен при расположении коллектора на таком расстоянии от водоупора, когда обеспечивается полное перехватывание грунтовых потоков. Кольцевой дренаж состоит из дрен, уложенных вдоль контура защищаемого объекта или площадки.

Применение того или иного типа дренажа зависит от гидрогеологических условий, расположения напластований отдельных пород грунта, степени их водопроницаемости, а также от необходимого понижения уровня грунтовых вод. Дренажные устройства могут быть открытые – в виде канав, каналов или лотков и закрытые трубчатые, состоящие из дренирующей трубы или траншеи с заполнением их фильтрующим материалом, а также водоотводящей части из труб со смотровыми колодцами для эксплуатационного надзора. Основным типом дренажа на территории мегаполиса является закрытый трубчатый дренаж.

В каждом случае дренирования устанавливается величина желаемого стояния уровня грунтовых вод после ввода дренажа в эксплуатацию – так называемая «норма осушения» (рис. 1.26). Так, например, для парковой территории уровень грунтовых вод допустим, в зависимости от пород деревьев, в 1,0-1,5 м от поверхности; для района застройки зданиями, имеющими подвалы – в пределах 3,5-1,0 м; для дорожного строительства – 1,0-1,5 м (см далее).

Проектирование дренажной сети. Наиболее оптимальный тип расположения дренажной сети в городских условиях – совмещение кольцевого (контурного) дренажа по периметру территории и систематического (внутреннего). Кольцевая дрена предотвращает попадание поверхностных и грунтовых вод с соседних территорий и может служить

коллектором для дрен-собирателей систематического дренажа. Внутренний систематический дренаж отводит избыточные воды непосредственно с участка, если он подвержен избыточному увлажнению. Дрены-осушители располагают равномерно по всему участку вдоль склона, если уклон поверхности меньше 0,001-0,003 или поперек – при больших уклонах. Исходя из наших расчетов по максимальным модулям стока для Московской области, можно рекомендовать использование дрен с диаметром труб около 15 см или канав, сечением 0,015м^2 (15х10см), проходящих насквозь единицу дренируемой площади (например 10м на 100м^2) [Экологические…, 2004].

Узловым вопросом при проектировании дренажной системы является определение междренных расстояний (l (м)). Ниже приводится простая формула для расчета этого параметра по данным о коэффициенте фильтрации почвы (К (м/сут))) (определяется экспериментально методами напорного впитывания и откачки грунтовых вод в скважинах [Вадюнина, Корчагина, 86]), начальном напоре (глубине залегания дрены) h_1 (м), расчетному времени отвода вод (t, сут) и норме осушения h_2 (м), выбираемой в зависимости от вида растительных культур (для садов – 1м, парков – 0,8-0,9м, лесопарков и питомников 0,6-0,8м, трав (газонов) – 0,5-0,7м. [Экологические…, 2004]:

$$l = 8.45\sqrt{\frac{K^{1/2}h_1(h_1 - h_2)t}{(h_2)^{4/3}}}$$

При естественном залегании уровня грунтовых вод ниже проектируемых отметок h_2, практикуется устройство несовершенных дрен (не достигающих уровня грунтовых вод) (рис. 1.26-б). В этом случае дренаж начинает работать только тогда, когда в почве создается избыток влаги в период дождей или схода снега. Время отвода вод (t) зависит от специфики дренируемого объекта. Большинство растений легко выдерживают переувлажнение почвы в течение 7-10 дней, поэтому можно принять максимальное время отвода вод, соответствующее этому периоду. Если существует опасность нарушения функционирования объекта, водной эрозии, подтопления помещений, следует использовать минимальное время – 1 сутки, и соответственно уменьшать промежутки между дренами. Например, для тяжелосуглинистого грунта с

коэффициентом фильтрации К=0.05м/сут, при глубине залегания дрены h_1=1,4м и норме осушения h_2 = 0,7м, для времени отвода вод 10 суток, согласно приведенной выше формулы, получаем, что дрены можно закладывать через промежутки в 15-16м. При минимальном расчетном времени (1сут) междренное расстояние сокращается до 5м, что соответственно, означает увеличение расхода средств на строительные материалы и оплату труда по реализации почвенной конструкции.

Помимо внутрипочвенного дренажа для борьбы с избыточным увлажнением и водной эрозией территории используются различного вида ***плоскостные инженерные сооружения*** – ***водотоки, террасы, валы, запруды,*** часто располагаемые в виде определенной последовательности – ***каскадов*** (рис. 1.27, 1.28). В отличие от дренажных конструкций, плоскостные сооружения направлены на перехват и отвод в естественные (природные) или рукотворные (ливневая канализация) коллекторы поверхностного стока, возникающего при обильных осадках, таянии снега и иных ситуациях. Система стоков водного бассейна территории состоит из основной сети и боковых коллекторов, впадающих в главный коллектор бассейна. Трасса главных коллекторов должна проходить по улицам, а также может быть проложена по территории зеленых насаждений или по кварталам.

Расчет террас и водотоков на склонах. Проектирование таких сооружений сводится к расчету их геометрических параметров и количества на заданной площади по максимально возможному объему вод, поступающих или отводимых с окружающей территории за определенное время. Обобщая известную литературную информацию в виде карт обеспеченности интенсивности ливневых осадков и талых вод для Московской области, можно заключить, что максимальный объем поверхностного стока в $м^3$ за час при 10% обеспеченности составляет $Q(м^3/час) = 320S$, а при 0,1% обеспеченности – $Q(м^3/час) = 640S$, где S – площадь водосборного бассейна в га, согласно нашим проектным разработкам [Экологические…2004]. Напомним, что 10% уровень обеспеченности соответствует вероятности проявления события 10 раз за 100лет, а 0,1% – раз за 1000лет. При обобщении

Табл.1.7. Скорость движения воды (м/сек) на разных основаниях при глубинах водного слоя до 0,4м (по [Агролесомелиорация, 56])

Пыль, ил: 0,12-0,17 м/сек
Песок мелкий 0,17-0,27 средний 0,27-0,47 крупный 0,47-0,53
Галька мелкая 0,95-1,2
Глины 0,33
Растительная земля 0,12-0,17
Дерн плашмя 0,66
Дерн в стенку 1,5
Мостовая 2,5-2,9
Бетон 4,2-7,5
Дерево до 25

использовалась информация для малых водосборных бассейнов (до 2км) и уклонов местности до 0,1 при минимальном впитывании. Для учета потенциального впитывания и внутрипочвенного стока, приведенные выше формулы необходимо умножить на коэффициент поверхностного стока (k) в зависимости от гранулометрического состава подстилающей поверхности (k = для супесей 0,5-0,7, для суглинков 0,65-0,8, для глин – 0,8-0,95) [Агролесомелиорация, 56]. В более точных расчетах следует вводить поправку на растительный покров, влажность, смачиваемость, набухание и другие характеристики почв, определяемые экспериментально. Выбирая данные о средних скоростях движения воды для различных подстилающих поверхностей (табл. 1.7), легко осуществить оценку параметров водотоков, рассчитанных на отвод избытка влаги при катастрофических осадках, определяемых предложенными формулами. Например, для отвода избытка вод по одернованному водотоку с территории 2 га при 10% обеспеченности, площадь его живого сечения будет равной отношению объема стекающей за секунду воды: $320 \cdot 2/60/60 = 0{,}18 м^3$/сек к скорости течения (0,66 м/сек): $0{,}18/0{,}66 = 0{,}27 м^2$. Принимая сечение квадратным, находим, что при допустимой высоте водного слоя 10см (0,1м), ширина водотока будет составлять 0,27/0,1=2,7м. Для бетонного

W- объем стекающей воды ($м^3$) ***W=40Sqk,*** S -площадь водосбора (га), q - интенсивность осадков (мм/мин), k - коэфф. поверхностного стока (супесь 0,5-0,7, суглинок 0,65-0,8, глина 0,8-0,95), b-половина основания, h - высота вала, ho - проектная высота запруды, α -угол вала β-угол склона. m=ctgα=4-5, b =2mh=8-10h ***tg b =icp=(H_1-H_2)/l cp***, V-объем прудка на 1м ширины: ***V=ho^2/2tg b*** , wo-объем воды,стекающий с $1м^2$ водосбора: ***wo=4qk/1000,*** R - длина валов: ***R=W/V*** , L расстояние между валами (м): ***L=V/wo***

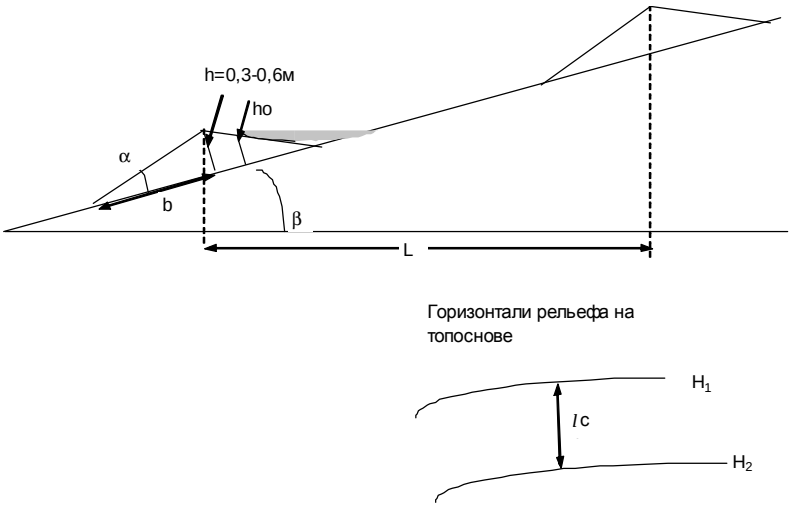
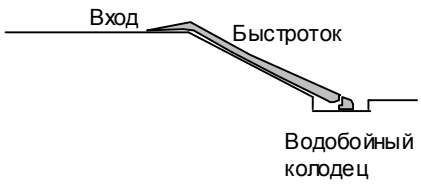


Рис. 1.27. Принципиальная схема и формулы расчета террас и водозаградительных валов на склонах по [Экологические., 2004].

водоотвода (скорость 6м/сек) соответствующий параметр будет равен всего 30см. При расчетах водоотводов на местности с сильным уклоном, необходимо использовать данные о допустимых скоростях движения по ним воды, не вызывающих размыва и сноса материала (уклоны до 0,1 для длинных растений – 2,44 м/сек, для скошенных – 2,7 м/сек; при уклонах 0,1-0,2 – 2-2,13 м/сек).

Если уклоны местности больше 0,14-0,15 (8-9^o) необходимо проводить террасирование с влагопоглощающими канавами – террасами; до 8-9^o, достаточно водоотводов в

линейные каскады (перепады), водотоки



Расход воды:

$Q=bm(2g)^{0,5}H^{1,5}$

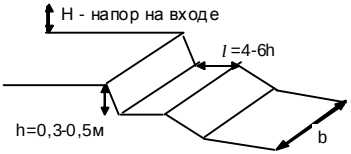
0,3<m<0,365

g=9,81 м/сек^2

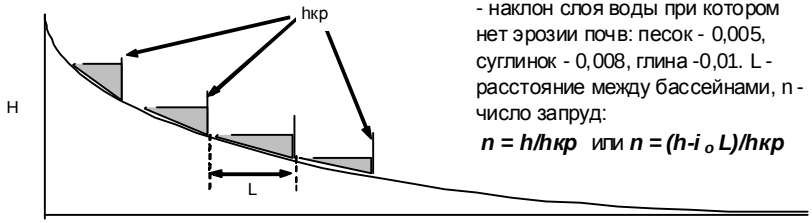
$Q=qS$,

q - интенсивность ливня

S - площадь водосбора



каскады бассейнов (запруд)



H - общий перепад высот, hp - проектная высота запруды (<1м), i_o - наклон слоя воды при котором нет эрозии почв: песок - 0,005, суглинок - 0,008, глина -0,01. L - расстояние между бассейнами, n - число запруд:

$n = h/h_{кр}$ или $n = (h-i_o L)/h_{кр}$

Рис. 1.28. Принципиальная схема и формулы расчета каскадных водоточных сооружений и конструкций по [Экологические, 2004].

сочетании с обваловкой и одернением территории (валы-террасы). Расчет террас ведется по индивидуальной емкости заполнения (объем прудка или канавы) и общему объему стекающих по поверхности максимально возможных осадков, продолжительность которых принимается равной одному часу (рис.1.27).

Специальные ***гидротехнические склоновые конструкции*** (быстротоки, каскады) проектируются с целью сбора поверхностных вод и отвода их в водоприемники. Их параметры находятся из условий равенства допустимого расхода воды на сооружении и их подвода с окружающей территории данной
площади (рис.1.28). Также рассчитываются скорости движения воды по быстротоку вначале и в конце перепада, а по ним – параметры водобойного колодца и дальнейших коммуникаций, по которым вода продолжит свой путь за пределами склона [Агролесомелиорация, 56, Экологические…,2004]. При организации системы водоемов (запруд) на склоне, следует учитывать максимально допустимый наклон слоя воды при котором не происходит размывания (эрозии) почв и на этом основании определять необходимое число запруд на склоне (рис.1.28). Еще раз отметим, что без должного проектирования и реализации описанных выше конструкций, невозможно уберечь территорию от водной эрозии и разрушения в условиях все возрастающей нестабильности климата.

ГЛАВА 2. Научно-методические и экспериментальные основы проектирования конструктоземов

2.1. Структурно-энергетическая концепция физического состояния почв и доступности влаги растениям.

Рассмотрим проблему количественной оценки эколого-физического состояния почв, поскольку от методологической базы, выбора критериев, инструментальных методов исследования комплекса свойств и процессов в почве во многом зависят результаты и адекватность действительности получаемых выводов о роли тех или иных компонентов почвенных конструкций, в том числе и биополимеров в их структурно-функциональной организации. Не менее значимым является первостепенная роль конструкций в водообеспеченности зеленых насаждений, в формировании их продуктивности и устойчивом функционировании (см. § 1.1 предыдущей главы), откуда следует высокая значимость почвенно-гидрофизических концепций и моделей в проектировании конструктоземов.

В основу данной работы положена структурно-функциональная термодинамическая концепция физического состояния почв, созданная заведующим кафедрой физики и мелиорации почв МГУ профессором А.Д Ворониным [Воронин, 84, 90]. Многочисленные исследования учеников и коллег А.Д. Воронина способствовали развитию концепции и ее дальнейшей дифференциации [Березин и др., 85, Березин, 87, Сапожников, 85, 94, Смагин и др., 98, 99, 2004, Смагин, 2003, Смагин, Садовникова, 2009, Судницын, 79, 95, Шеин и др., 90, 99, Шеин, 2005, Теории и методы…, 2007]. Интегральным базовым показателем физического состояния в этих исследованиях является ***основная гидрофизическая характеристика (ОГХ)*** – зависимость между термодинамическим потенциалом (давлением) влаги (ψ) и ее содержанием в почве (W). Эта зависимость четко отражает характер взаимодействия твердой, жидкой и газовой фаз почвы, определяющего, в свою очередь ее физическое состояние. Связь ОГХ с важнейшими эколого-физическими свойствами (дисперсностью, агрегированностью, дифференциальной пористостью, плотностью, доступностью

почвенной влаги, реологическими свойствами, проницаемостью для водных растворов и газообразных веществ, уровнем засоления...) позволяет считать эту характеристику своего рода физическим паспортом почвы, по которому можно получить достаточно полные сведения о любом интересующем нас показателе.

Обратимся к анализу особенностей ОГХ, как базового показателя эколого-физического состояния почв (рис.2.1). Исследованиями А.Д.Воронина [84, 90] показано, что на ОГХ можно выделить ряд ***предельно равновесных (критических) состояний***, с которыми связано большинство физических свойств почв и протекающих в них физических процессов. Им ставятся в соответствие известные в физике почв параметры – почвенно-энергетические и почвенно-гидрологические константы (ПГК), ограничивающие области с доминированием тех или иных сил, действующих на почвенную влагу и влияющих на ее подвижность и доступность растениям, а также – структурно-механические показатели (пределы пластичности, текучести, усадки, границы образования трещин, агрегированности), маркирующие смену реологических и механических свойств почвы при изменении содержания жидкой фазы. Тем самым в работах А.Д. Воронина впервые удалось совместить концепцию категорий и форм влаги с термодинамическим подходом и выделить на ОГХ области доминирования физических сил различной природы, определяющих физическое состояние почв и их водоудерживающую способность (рис.2.1). Напомним, что классическая концепция форм и категорий влаги была подвергнута в 70-80^{x} годах критике со стороны ведущих зарубежных гидрофизиков и попытке замены на современный термодинамический подход с интегральным осредненным показателем водоудерживания в виде ОГХ. Однако, объективность концепции, реальное существование критических параметров (ПГК) подтверждается тем, что при непрерывном изменении содержания влаги в почвах в них возникают более или менее резкие (дискретные) качественные изменения физического состояния – смены гидрофизических, структурных, механических, электрических и других свойств, объяснить которые без представления о границах, пускай и подвижных,

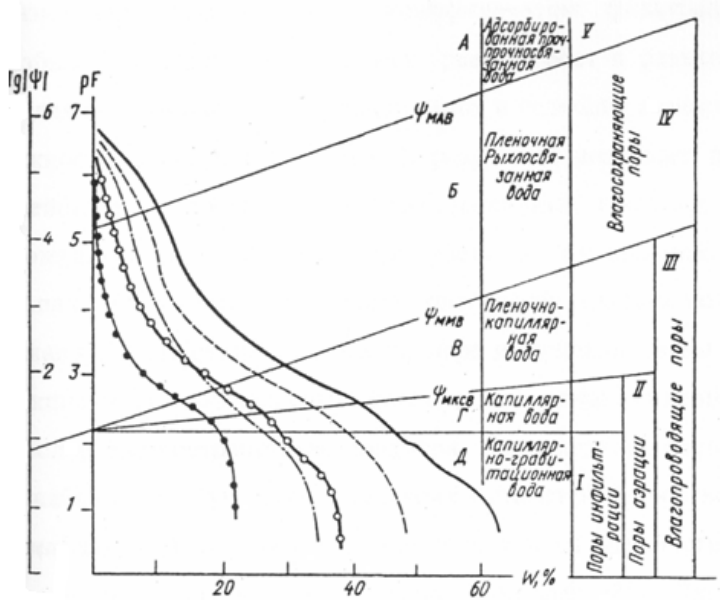


Рис. 2.1. Связь физических показателей почв с ОГХ (по [Воронин, 84])

но границах проявления тех или иных физических сил в почве невозможно.

В коллективных исследованиях Санкт-Петербургского АФИ и Университетской школы А.Д. Воронина предпринята попытка теоретического осмысления подобных состояний, поиска физических механизмов, контролирующих смену характеристик почвы как физической системы в процессах увлажнения-иссушения. Практическим результатом таких изысканий будет в первую очередь достоверное, физически-обоснованное выделение на ОГХ критических предельно равновесных состояний, позволяющее использовать ОГХ в качестве диаграммы эколого-физического состояния почвы для прогноза флюктуационной динамики комплекса ее свойств при изменении содержания влаги, разработки градаций экологического и технологического оптимума. В последние годы и за рубежом стали появляться работы, использующие ОГХ и ее сингулярные точки для оценки «физического

качества» почвы. В частности серия публикаций [Dexter, 2004] посвящена данной теме и в ней основным параметром физического состояния является наклон ОГХ в точке перегиба, соответствующей максимуму на структурных кривых распределения пор по их размерам. О некоторых расхождениях между нашими и зарубежными результатами анализа модели ОГХ и нахождения ее сингулярных точек будет сказано позже.

Возвращаясь к анализу отечественной термодинамической концепции физического состояния почв, для начала рассмотрим последовательно серию критических (предельно-равновесных) состояний почвенной физической системы, которые возникают по мере ее иссушения. Состояние насыщения почвы или заполнения порового пространства влагой отвечает почвенно-гидрологической константе, носящей название ***полной влагоемкости*** (водовместимости) – ПВ или влажности насыщения почвы (Ws)).

В состоянии насыщения почвы влагой, капиллярно-сорбционный (матричный) потенциал, или энергия водоудерживания со стороны почвы как капиллярно-пористого тела равна нулю. Такая влага свободно передвигается в поле силы тяжести с максимальной скоростью, оцениваемой физическим показателем – коэффициентом фильтрации ($К_ф$). Однако, находящаяся в избытке почвенная вода, может угнетать рост и развитие растений. Подобная ситуация нередка для почв гидроморфных ландшафтов и условий сезонного переувлажнения, для которых влажность почвы близка к ПВ. В результате возникает дефицит кислорода, угнетающее воздействие углекислоты и других токсичных газов на корневые системы культур, сопровождающиеся угнетением их роста и отмиранием (так называемым «вымоканием»). Анализ ОГХ позволяет выявить критическое значение потенциала почвенной влаги и ее содержания, достижение которых по мере иссушения почвы от ПВ, приводит к нормальному функционированию корневых систем и отсутствию симптомов угнетения роста. В одном из наиболее распространенных подходов, критическому состоянию увлажнения, выше которого наблюдается угнетение растений, ставится в соответствие показатели давления (потенциала) барботирования и соответствующей влажности, а в англоязычных публикациях - давления входа воздуха в почву

[Глобус, 87, Шеин, Гудима, 90, Campbell, 85]. Его можно также определить графическим или аналитическим способом по ОГХ, как первую точку перегиба при движении от ПВ в область меньших влажностей [Глобус, 87, Смагин и др., 99]. Аналитический метод связан с аппроксимацией ОГХ моделью Кэмпбелла [Campbell, 85]:

$$\psi_m = \psi_e \left(\frac{W}{W_s} \right)^{-b}, \qquad (2.1)$$

или ван-Генухтена [Глобус, 87, Шеин, 2005]:

$$\psi_m = \psi_e \left(\left(\frac{W - W_a}{W_s - W_a} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}, \text{ где } m = 1 - \frac{1}{n}, \qquad (2.2)$$

ψ_m – матричный (капиллярно-сорбционный) потенциал, ψ_e – искомый параметр потенциала (давления) барботирования, W_a – параметр минимальной влажности, соответствующий прочносвязанной, неподвижной для вязкого течения влаги, b, n, – эмпирические константы, характеризующие наклон ОГХ и зависящие от дисперсности и плотности сложения образца. Для почв и грунтов легкого гранулометрического состава, с которыми в основном приходится иметь дело при конструировании, влажности (W, W_a, W_s) могут быть выражены в долях (процентах) от массы почвы. В случае набухающих почв и почвенных материалов, плотности которых не остаются постоянными и зависят от содержания влаги (набухание-усадка) в формулах 2.1, 2.2 необходимо использовать показатели объемных, а не весовых влажностей. То же справедливо и в случае применения функций ОГХ в компьютерных моделях динамики влаги, тепла и растворенных веществ (см. далее).

Параметры b или n в зарубежных исследованиях широко используются при сравнительном анализе физических свойств, классификации почв по дисперсности, расчете функций влаго-, тепло-, и газопроводности [Gupta, Larson, 79, Campbell, 85, Shirazi et al., 88, Dexter, 2004]. В работах [van Genuchten, 80, Mualem, 76, Campbell, 85,] с использованием уравнений (2.1, 2.2) и теории Муалема [Mualem, 76] получены формулы для расчета ненасыщенной гидравлической проводимости (функции

влагопроводности) в зависимости от влажности или степени насыщенности почвы влагой:

$$K = K_\phi \left(\frac{W}{W_s} \right)^{2b+3}, \qquad (2.3)$$

$$K = K_\phi \left(\frac{W - W_a}{W_s - W_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \left(1 - \left(\frac{W - W_a}{W_s - W_a} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^{m} \right)^{2}, \qquad (2.4)$$

где K_ϕ – коэффициент фильтрации. На основе этих двух базовых зависимостей (ОГХ и функции влагопроводности) производится расчет ***динамики влажности*** в почве или в моделируемой почвенной конструкции [Воронин, 86, Шеин, 2005, Смагин, Садовникова, 2009]. Тем самым возможен прогноз динамики влаги в почвах или искусственно созданных почвенных конструкциях с теми или иными компонентами (материалами), что в свою очередь позволяет в современной физике почв решать обратные задачи – подбора оптимальных материалов (почвенных кондиционеров), их дисперсности, концентрации для конструирования почв с заданными гидрофизическими и технологическими свойствами [Шеин, 2005].

Заметим, что, несмотря на определяющее значение ОГХ для моделирования массопереноса в почвах, до сих пор эта зависимость является эмпирической, равно как и подавляющее большинство известных моделей этой функции. В результате область их действия обычно меньше чем диапазон естественного варьирования переменных ψ и W. Так, для наиболее часто встречающейся в современных зарубежных моделях массопереноса функции ван-Генухтена (2.2) эта область имеет границы W_s и W_a. При $W = W_a$ в функции ван-Генухтена или при $W = 0$ в функции Кэмпбелла (2.1), очевидно, возникает неопределенность по типу деления на нуль. То есть ОГХ неограниченно устремляется вверх, параллельно оси потенциалов. Есть интересные попытки разработок фундаментальных моделей ОГХ, использующие теорию электрических взаимодействий в почвенных физических системах [Судницын, 79, Смагин, 2003, Smagin, 2011], но они также не распространяются на весь диапазон ОГХ, особенно для

почв с явно выраженной макропористостью, где поверхностные взаимодействия уступают капиллярным явлениям первого рода. А поскольку именно в этой области происходит наиболее интенсивный массоперенос влаги, подобные модели будут, очевидно, хуже эмпирических (типа (2.2)) описывать транспорт влаги и растворенных веществ. Видимо в будущем стоит попытаться направить усилия на разработку общей теории электрических (поверхностных, ионно-электростатических) и макрокапиллярных взаимодействий для создания фундаментальных моделей ОГХ, хотя весьма вероятно для обобщения сил здесь нельзя будет пользоваться базовым принципом аддитивности потенциалов.

Возвращаясь к термодинамической оценке верхнего предела оптимального увлажнения, отметим, что вхождение воздуха в насыщенную почву приводит к некоторому разобщению элементов водного тела почвы воздухоносными каналами (полостями). С физической точки зрения при этом начинает проявляться эффект капиллярности пористого тела и связанный с ним переход от свободной (гравитационной) категории влаги к ***капиллярно-гравитационной,*** удерживаемой в почве благодаря менискам капилляров с отрицательной кривизной. Есть основания полагать, что это состояние характеризует верхний предел пластичности [Смагин и др., 99, Аксенов, 2003]. По данным [Аксенов, 2003] влажность предела текучести для большинства генетических горизонтов серых лесных и дерново-подзолистых почв суглинистого состава соответствовала матричному потенциалу почвенной влаги 3-10 Дж/кг.

В концепции Воронина для оценки верхней границы появления капиллярных эффектов предлагается использовать единое значение матричного потенциала 14,7 Дж/кг [Воронин, 84, 86], однако вероятнее всего такой способ не будет давать адекватных результатов, особенно в почвах с облегченным гранулометрическим составом, где давления 14-15 кПа (140-150 см. вод. ст.) достаточно, чтобы удалить основную часть влаги, в том числе и капиллярную и сильно иссушить почву [Смагин, 2003]. Поэтому в наших исследованиях предложено определять подобное состояние в почвах по точке перегиба на ОГХ [Смагин и др., 99]. Хотя при использовании с этой целью аналитического

выражения из функции ван-Генухтена получается несоответствие, поскольку в этой функции точка перегиба не совпадает с ординатой давления барботирования. Отсюда влажность точки перегиба будет для этой функции ниже, чем равновесная влажность при $\psi_m = \psi_e$, численно равная, согласно (2.2), $0{,}5^m(W_s - W_a) + W_a$. Поэтому формально для модели ван-Генухтена возможны два варианта выделения на ОГХ искомого состояния – по точке перегиба или по условию $\psi_m = \psi_e$. Мы избрали первый вариант, считая его более обоснованным с физической точки зрения (реальная сингулярная точка), и посчитали возможным отождествить полученную влажность с ***капиллярной влагоемкостью (КВ)***, не имеющей точного определения и физически обоснованного метода оценки в физике почв [Смагин, Садовникова 2009]. Исследуя аналитически функцию (2.2), несложно определить условие точки перегиба как [Смагин, Садовникова 2009]:

$$\left(\frac{W_{кр} - W_a}{W_s - W_a}\right) = (m+1)^{-m}, \qquad (2.5)$$

откуда находится величина $КВ = W_{кр}$:

$$КВ = (m+1)^{-m}(W_s - W_a) + W_a \qquad (2.6)$$

Подставляя значение абсциссы точки перегиба $W_{кр}$ в исходную функцию ван-Генухтена (2.2) определяем ординату или значение потенциала при капиллярной влагоемкости:

$$\psi_{КВ} = \psi_e(m)^{1-m} \qquad (2.7)$$

Как уже говорилось, в модели ван-Генухтена величина точки перегиба будет несколько ниже чем влажность при давлении входа воздуха в пористую среду (потенциале барботирования ψ_e), что в общем следует из выбранного в данной модели соотношения показателей степени $m=1–1/n$ (условие Муалема). Несложно показать, что для любых m и n в формуле (2.2) условие перегиба (ноль второй производной функции (2.2) в точке давления барботирования $\psi = \psi_e$ или соответствующей влажности барботирования $0{,}5^m(W_s - W_a) + W_a$ будет выглядеть как $m=1–2/n$ (условие Бурдина). В целом при увеличении влажности в области $КВ(W_e) \le W \le ПВ$ вода находится преимущественно под действием гравитационных сил, сцепление между частицами почвы при таком предельном

увлажнении минимально и она теряет качество пластичности и переходит в состояние текучести.

Дальнейшее иссушение почвы сопровождается все большей дифференциацией сплошного водного тела на отдельные элементы, удерживаемые капиллярными силами. Состояние их предельного равновесия с гравитационными силами, стремящимися удалить влагу из почвы посредством гравитационного стекания, носит название ***максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкости (МКСВ)*** (рис.2.1). По Воронину такому состоянию соответствует предельная полевая или ***наименьшая влагоемкость (НВ),*** определяемая в однородных почвах как остаточная влажность после гравитационного стекания воды. Заметим, что до сих пор в физике почв нет единой точки зрения на эту категорию почвенной влаги и универсальной методики ее получения, хотя она активно используется в гидрофизических и почвенно-мелиоративных расчетах движения влаги и растворенных веществ. Так, во многих балансовых моделях массопереноса НВ считается критическим значением, при котором практически прекращается нисходящее движение почвенной влаги [Шеин, 2005]. На самом деле такое прекращение для жидкой влаги, по-видимому, будет иметь место лишь при полном разобщении водного тела и переходе капиллярной влаги в пленочную (см. следующее критическое состояние – ММВ), хотя по мнению некоторых специалистов в грубодисперсных почвах наблюдается очень медленный пленочный гравитационный сток при практически нулевом градиенте капиллярно-сорбционного потенциала [Гаель, Смирнова, 99]. До состояния ММВ (ВРК) связанная капиллярными силами влага способна передвигаться как за счет локальных градиентов матричного потенциала, так и гравитационным путем, поскольку равновесие между капиллярными силами и силой тяжести водного тела является неустойчивым [Смагин, 2003]. Не случайно в полевых экспериментах по определению НВ, значения этой величины сильно варьируют и зависят от множества факторов – исходной влажности почвы и равномерности распределения влаги, времени отбора проб (чем дольше промежуток «достижения равновесия», тем меньше НВ), латеральных потоков по плужной подошве, преимущественного массопереноса по каналам,

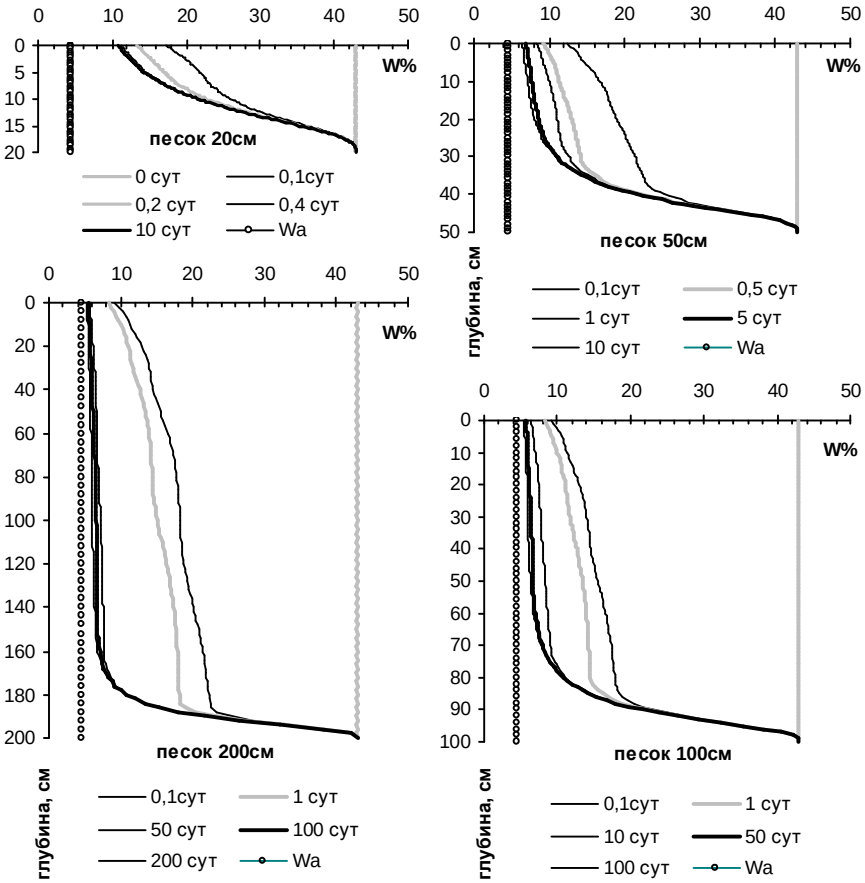


Рис. 2.2. Моделирование динамики влажности песчаной почвы при свободном гравитационном оттоке и изоляции с поверхности (среда HYDRUS-1D).

корневым системам, пальчатым гидроструктурам. В последних случаях движущейся воде энергетически выгоднее перемещаться через пористую среду не сплошным фронтом, а отдельными локальными потоками. Теоретический анализ, исходя из равновесия сил, показывает, что состояний НВ для одной и той же почвы может быть множество, в зависимости от мощности единого водного тела в почве (h), поскольку одной и той же водоудерживающей способности при этом противостоит

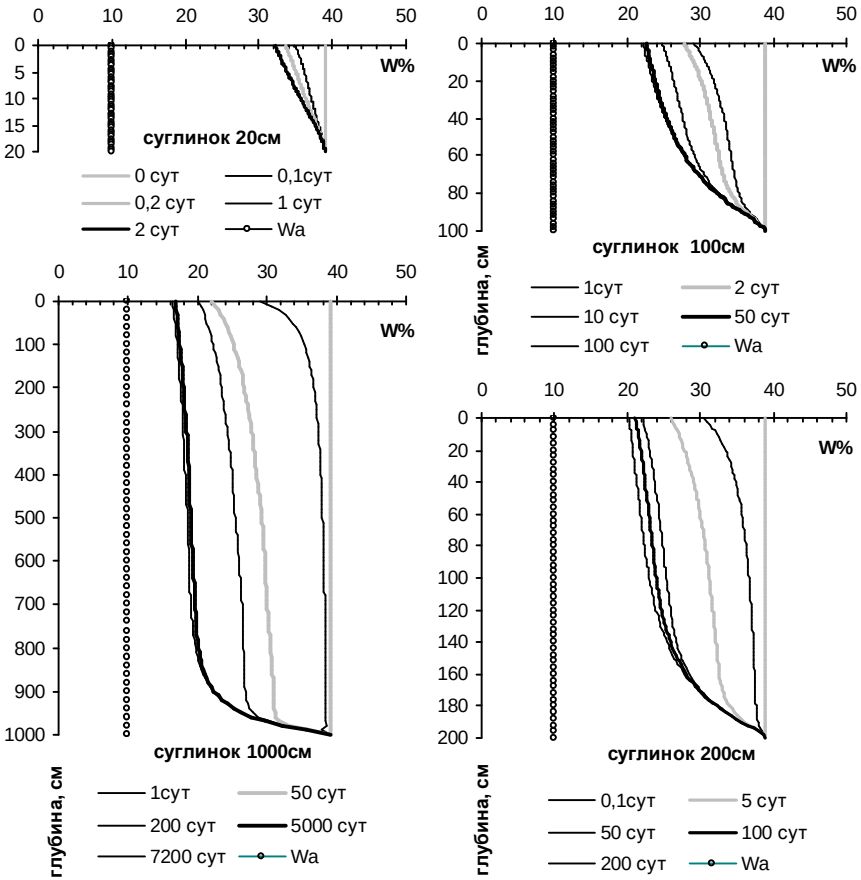


Рис. 2.3. Моделирование динамики влажности суглинистой почвы при свободном гравитационном оттоке и изоляции с поверхности (среда HYDRUS-1D).

переменная сила тяжести (гидростатическое давление $\rho_l gh$) [Смагин, 2003, 2005]. В этом несложно убедиться, рассматривая результаты моделирования динамики влажности разных по гранулометрическому составу почв в условиях изоляции с поверхности и свободного гравитационного оттока влаги (аналогичные полевому методу определения НВ) в зависимости от мощности почвенной толщи и фактора времени (рис. 2.2, 2.3). Как видно, чем глубже однородный профиль (расстояние до

свободной поверхности воды в виде УГВ) тем меньше остаточная влажность в верхнем слое (НВ) и тем дольше время установления равновесия. По существу, в однородной почве устанавливается равновесное распределение влажности, соответствующее кривой ОГХ, для которой ордината (ось давлений), выраженная в см.вд.ст., берется численно равной расстоянию от нижней (УГВ) до верхней границы профиля. Это позволяет проводить определение НВ по ОГХ для почв и почвенных конструкций конечной мощности [Смагин, 2003, 2005, Смагин и др., 2008]. Однако время установления подобного равновесия может быть весьма большим в зависимости от мощности почвы и ее гранулометрического состава. Лишь для короткопрофильных почв (20-50см) вполне достаточно 1-2 суток, чтобы достигнуть равновесия между водоудерживающими силами почвы и силой тяжести, стремящейся удалить влагу. Для метрового профиля на это требуется порядка 50 суток, поэтому рекомендуемые в руководствах по физике почв сроки в виде 2-4 суток «по Качинскому» [Вадюнина, Корчагина, 86] очевидно, не позволяют определить равновесную влажность. Полученная таким методом НВ будет в песке в 1,3 раза превышать равновесную влажность, а в суглинке почти в 2 раза, как следует из анализа динамики модельных кривых влажности (рис. 2.2, 2.3). Для более глубоких автоморфных почв с профилем от 2м и более, время выхода на равновесие может исчисляться годами. Этот эффект в был изучен А.А.Роде с сотрудниками в длительных полевых экспериментах, в результате чего появился термин «истинная НВ» для определения действительно равновесного состояния распределения влаги в поле силы тяжести [Роде, 52]. Чем больше гидростатическое давление (высота профиля), тем сильнее дренирующее воздействие для верхних слоев почвы и в пределе остаточная влажность в них должна приближаться к значению W_a в функции Ван-Генухтена (2.2) (рис. 2.2, 2.3). Для песков с низкой водоудерживающей способностью такое приближение, как видно, достигается уже при мощности профиля в 1-2м. Для суглинков даже 10 м профиль не способен требуемое обеспечить гравитационное давление влаги и остаточная влажность в верхнем слое минимум в 1,5 раза превышает параметр W_a (рис. 2.2, 2.3).

В целом, величина НВ, равно как и ее аналог для капиллярного поднятия (впитывания) – КВ, являются чисто условными понятиями и не отражают в подавляющем большинстве случаев равновесное распределение почвенной влаги в поле силы тяжести. Эти «константы», вопреки традиционному мнению не могут характеризовать почву одним значением. Они, как и ОГХ представляют собою спектр величин, функцию в зависимости от мощности почвенного слоя (единого водного тела), и только вычисляя запасы влаги по слою почвы данной мощности (интегрируя отрезок ОГХ) можно единым числом оценить его влагоемкость. Принятые в физике почв методики полевого определения НВ оказываются несостоятельными с позиций обоснования сроков установления равновесия и прекращения гравитационного оттока влаги. Лишь для короткопрофильных почв и их гидравлических элементов (слоев) можно, исследуя на 2 сутки распределение влаги получить физически-обоснованные значения НВ (КВ). Для обычных автоморфных почв с глубиной залегания грунтовых вод от 2м и более, НВ это только стадия на пути к равновесию, которое может устанавливаться годами. Отсюда ни о каком прекращении гравитационного оттока при влажностях ниже НВ говорить нельзя (как это принято). И расчет поливных норм по НВ всегда будет приводить к переполиву, стеканию и аккумуляции влаги в нижних слоях почвы, что в свою очередь вызывает подъем грунтовых вод и вторичное засоление. Весьма вероятно, что эта широко распространенная и поныне ошибка отечественной мелиорации лежит в основе повсеместной деградации поливных почв в семиаридной и аридной зонах бывшего СССР.

Оценка равновесной влажности, как уже отмечалось, может производиться по кривым ОГХ. По эмпирическому методу А.Д. Воронина [84, 86] величина МКСВ может быть определена как точка пересечения ОГХ с прямой $\lg\psi_m = 1{,}17 + W$ (W в долях, а не %) в координатах $\lg\psi_m(W)$ или степенной функции $\psi_m = 10^{(1,17+W)}$ в обычных координатах $\psi_m(W)$ (рис.2.1). Мы предложили более обоснованный с физической точки зрения подход для определения этой величины по ОГХ с использованием высоты капиллярного поднятия ($H_{кап}$) и (или) расстояния от водоносного горизонта (h), если профиль

находится в пределах капиллярной каймы ($h<H_{кап}$) [Смагин, 2003, 2005, Смагин и др., 2008]. С этой целью надо лишь отложить по оси давления почвенной влаги, выраженного в см.вд.ст., соответствующие величины $H_{кап}$ или h в см и, проведя секущие параллельно оси влажностей, получить искомую величину как точку пересечения с ОГХ. В случае тяжелых почв подобный способ будет давать близкие результаты к эмпирическому методу Воронина, поскольку высоты капиллярного поднятия для них находятся в пределах 150-300 см, а секущая $\psi_m = 10^{(1,17+W)}$ дает при влажностях диапазона НВ 0,1-0,3г/г (10-30%) сходные значения матричного потенциала в 18-30 Дж/кг или 180-300 см.вд.ст. эквивалентного давления. Для песков метод Воронина даст явно заниженные величины равновесной влажности (НВ), так как эмпирические секущие будут находиться на уровне 150-180 см.вд.ст., тогда как величины $H_{кап}$ в подавляющем большинстве случаев не превысят 20-50см [Смагин, 2005].

В диапазоне влажности от полной влагоемкости до МКСВ влага находится преимущественно под действием гравитационных и макрокапиллярных сил, а освобождающиеся при дренировании почвы поры являются по классификации Воронина ***порами аэрации и инфильтрации***, по которым осуществляется наиболее интенсивный влаго- и воздухобмен в почвах (рис. 2.1). В указанном диапазоне наблюдается пластичное поведение тонкодисперсных почв и грунтов, переходящее в состояние текучести под действием гравитационных сил при повышении влажности

Следующим критическим состоянием, выделяемым на ОГХ, согласно, термодинамической концепции, является состояние ***максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ)***. При этом дренируются доминирующие в структуре пористого тела капилляры и влага в почве находится преимущественно в виде пленок, прочно удерживаемых почвенными частицами, что и обуславливает ее относительную неподвижность. Термин ММВ как категории почвенной влаги был введен А.Ф. Лебедевым [1936] и им же было показано, что в области влажностей ниже ММВ движение влаги в почве практически прекращается. Это происходит потому, что пленочный и пародиффузионный механизмы в изотермических условиях

массопереноса не в состоянии обеспечить сколь либо существенное перемещение воды, сопоставимое с гравитационным и капиллярным. Влага за пределами ММВ по причине ее связности и малоподвижности становится малодоступной для растений. Поры в структуре капиллярно-пористой почвенной среды в диапазоне пленочной рыхлосвязанной влаги отнесены к категории ***влагосохраняющих.*** В области ММВ и близкой к ней влажности разрыва капиллярных связей складываются условия оптимальные для обработки почвы, в частности ее крошения и образования агрономически ценных агрегатов округлой формы (состояние «физической спелости») [Воронин, 84, 90]. По мнению Воронина, это связано с тем, что свободная энергия почвенной влаги в основном определяется здесь площадью поверхности пленки, которая при перемешивании и рыхлении почвы орудиями обработки стремиться принять вместе с порцией почвенных частиц форму с наименьшей поверхностью – то есть шарообразную. Податливость к обработке почв также обуславливается падением прочности сцепления почвенных частиц при исчезновении капиллярной сплошности и менисковых контактов, поэтому в данной области влажности наблюдается минимальное удельное сопротивление почв пахоте. Вероятен и еще один механизм «физической спелости» – ионно-электростатическое отталкивание или действие ПАВ-барьера для тонкодисперсных почвенных частиц на фоне потери устойчивости окружающих их водных пленок [Смагин, 2003]. С критическим состоянием ММВ связаны предел пластичности тонкодисперсных почв и грунтов, экстремум пластической прочности, а также предел структурной усадки и наиболее активная фрагментация почвы (трещинообразование) [Воронин, 84, 90, Березин, 87, Сапожников, 94, Аксенов, 2003].

Для макрокапиллярных пористых тел состояние ММВ фактически тождественно почвенно-гидрологической константе ***ВРК (влажности разрыва капиллярной связи)***, поскольку как уже отмечалось, в таком состоянии почвенная влага теряет гидравлическую сплошность и способность к капиллярному перемещению. Для определения равновесной влажности и потенциала в состоянии ММВ (ВРК) Воронин рекомендовал использовать регрессию $\lg\psi_m = 1{,}17 + 3W$ (W, г/г) в

полулогарифмических или $\psi_m = 10^{(1,17+3W)}$ в простых координатах ψ_m (W), пересечение которой с ОГХ дает искомую точку. Мы предложили оригинальный метод количественной оценки ММВ по кривым зависимости электропроводности порового раствора от влажности [Смагин, 2005]. С физической точки зрения ММВ (ВРК) должна быть тождественна «истинной НВ» по Роде (см. выше) поскольку именно в этом состоянии полностью прекращается капиллярно-гравитационный отток влаги. Превышение равновесной НВ величин ВРК по сути может быть лишь для почв с коротким профилем ($h<H_{кап}$), отдельных слоев с нарушенной гидравлической связью или низкой влагопроводностью на границах (подстилание суглинка песком, песка щебнем или галькой, нижележащий водоупор (верховодка)). В однородных хорошо дренируемых почвах подобное превышение может возникать только по причине медленного достижения величиной НВ равновесного состояния (рис. 2.2, 2.3). Медленный гравитационный сток будет продолжаться до нескольких лет (в почвах с глубоким профилем), и лишь после этого возникнет равновесное состояние («истинная НВ» по Роде или тождественное ей состояние ВРК). И если «истинная НВ»=ММВ(ВРК) именно это состояние по логике должно получаться при оценке по максимальной высоте капиллярного поднятия на ОГХ. Вероятно это так, хотя здесь возможна проблема с гистерезисом, поскольку капиллярное поднятие это увлажнение, тогда как капиллярно-гравитационный отток – иссушение почвы. При использовании функции ван-Генухтена для аппроксимации ОГХ, очевидно, состоянию ММВ (ВРК) должен соответствовать параметр W_a, ведь лишь в таком случае для полнопрофильных почв в результате моделирования свободного гравитационного оттока и изоляции от испарения в верхней части почвенной толщи можно получить практически постоянную влажность численно стремящуюся к W_a (рис. 2.2, 2.3). На самом же деле показатель Wa чаще всего выбирается значительно более низким по величине, чем ММВ (ВРК) и приближается к МГ (нерастворяющему объему) или МАВ (см далее). Эти несоответствия лишний раз показывают плохую исследованность проблемы выделения почвенно-

гидрофизических констант и обоснования их физического смысла, как в теоретическом, так и в практическом отношениях.

Дальнейшее иссушение почвы за пределами ММВ (ВРК) приводит к постепенной смене пленочной рыхлосвязанной влаги на адсорбированную поверхностью элементарных почвенных частиц (ЭПЧ). С экологической точки зрения сорбционная влага в почве недоступна растениям и почвы при естественных влажностях в этом диапазоне будут практически бесплодны, только отдельные виды растений адаптированные к засухе благодаря способности аккумулировать влагу в своих тканях или доставать ее из глубоких водоносных горизонтов, могут выживать в таких условиях. Формально считается, что константе влаги завядания (ВЗ) растений соответствует абсолютное значение потенциала 1500 Дж/кг. Хотя очевидна условность подобного состояния и его зависимость не только от свойств твердой фазы почвы (ОГХ), но и от концентрации осмотически-активных веществ почвенного раствора (уровня засоления), а также физиологических особенностей конкретных видов растений, определяющих максимальные величины их сосущей силы (корневого потенциала).

Анализ сорбционного участка кривых водоудерживания или соответствующих ему изотерм сорбции паров воды почвой представляет интерес для определения механизмов взаимодействия твердой и жидкой фаз почвы, а также оценки ее дисперсности (удельной поверхности). При этом следует помнить, что с теоретической точки зрения рассчитанная по изотермам сорбции кривая представляет собой зависимость полного (а не матричного) потенциала от влажности и совмещать ее с ОГХ, как это делается в подавляющем большинстве работ по гидрофизике, в общем то некорректно. На практике возможны сильные расхождения при попытках такого совмещения, в особенности для засоленных почв, в которых иссушение проводилось не путем механического удаления влаги (отсасывание, прессование, центрифугирование), а посредством испарения влаги. Тогда растворимые соли выпадают в осадок и становятся дополнительными гигроскопичными элементами твердой фазы почвы, увеличивая эффективную удельную поверхность и равновесную влажность на кривых изотерм сорбции.

В сорбционной области выделяется еще одно критическое состояние, которое отчетливо диагностируется на кривых изотерм сорбции водяного пара в виде точки перегиба в средней области [Смагин, 2005, Smagin, 2011]. Такой перегиб и последующее значительное увеличение равновесной влажности при относительно небольшом росте P/P_0 вызывается началом полимолекулярной конденсации влаги на поверхности ЭПЧ и объемной конденсации в микрокапиллярах. А.Д.Воронин назвал подобное критическое состояние ***максимальной адсорбционной влагоемкостью (МАВ)*** и предложил для его определения регрессию $\lg\psi_m = 4{,}2 + 3W$ в полулогарифмических координатах $\lg\psi_m$ (W) (рис.2.1). По его данным МАВ соответствует максимальная прочность почвы в диапазоне сорбированной влаги [Воронин, 90]. Величина МАВ или иные, несколько превышающие ее, в основном условные характеристики прочносвязанной влаги (максимальная гигроскопия, «нерастворяющий объем»), активно используются в гидрофизике почв в ряде физических моделей массопереноса и структурной организации почв [Воронин, 84,86,90, Глобус, 87, Березин,87, Шеин 2005].

Имея ОГХ в качестве базового показателя (паспорта) физического состояния почвы, можно получить еще одну важную характеристику – функцию распределения объемов пор по их размерам (диаметрам) или так называемую ***структурную кривую*** [Шеин, 2005]. С этой целью можно воспользоваться следующим наиболее простым способом – рассчитать, согласно формуле Жюрена радиусы пор определенных классов по данным о потенциале (давлении): r(мм)=1,5/P, где P – давление в см.вод.ст. и предварительно построив ОГХ для объемной влажности с учетом плотности почвы ($W\rho_b$) снять по графику ОГХ соответствующие значения объемов пор. При наличии непрерывной кривой ОГХ, например, в виде функции ван-Генухтена (формула 2.2) – можно получить структурную кривую аналитическим дифференцированием ОГХ с выводом так называемой дифференциальной влагоемкости. Расчетная формула для функции распределения объемов пор по их размерам из ОГХ будет при этом выглядеть как [Смагин, Садовникова, 2009]:

$$V(r) = (n-1)(W_s - W_a)\rho_b \left(1 + \left(\frac{P}{P_e}\right)^n\right)^{-m-1} \left(\frac{P}{P_e}\right)^n , \qquad (2.8)$$

где P, Pe – эквивалентное матричному потенциалу (ψ_m) капиллярно-сорбционное давление почвенной влаги и параметр эквивалентного давления барботирования, выраженные в см.вд.ст., n, m – параметры функции ван-Генухтена, ρ_b – плотность почвы. Сходная зависимость предложена в работах [Dexter, 2004].

Помимо дифференцирования для получения еще одного показателя из ОГХ – ***суммарной (интегральной) энергии водоудерживания*** со стороны твердофазного матрикса в наших разработках предлагается обратная процедура – численное или аналитическое интегрирование ОГХ [Смагин, 2003, Смагин, Садовникова и др., 99, 2004, 2009]. Итоговый показатель $E=\int\psi_m dW$ удобно использовать при сравнительном анализе ОГХ и влиянии органических веществ, включая синтетические кондиционеры, на водоудерживающую способность почв.

В термодинамической концепции физического состояния ОГХ традиционно изображается в координатах $lg\psi$ от W или pF от W, и в области возможных равновесных состояний выделяются критические характерные (МАВ, МГ, ВЗ, ММВ, ВРК, МКСВ, входа воздуха, ПВ …), соответствующие смене структурно-механических и реологических свойств, подвижности и доступности влаги растениям, категорий влаги и функций пор (рис.2.1). Можно дополнить эту информацию, рассчитать по данным электропроводности почвенного раствора его осмотическое давление (потенциал) (ψ_{os}) и если необходимо выявить смещение ОГХ при модельных экспериментах с нагрузкой в центрифужном поле [Смагин, Садовникова и др., 99]. В этом случае сумма капиллярно-сорбционного (матричного) потенциала (ψ_m) с осмотическим (ψ_{os}) и нагрузки ($\psi_н$) будет характеризовать ***полную энергию связи воды в почве***. Прямое определение полного потенциала и его зависимости от влажности возможно с помощью модифицированного криоскопического метода на базе датчиков «термохрон», а также динамического метода оценки изотерм сорбции паров воды с использованием датчиков «гигрохрон», согласно

[Смагин, 2005, Смагин и др., 2006]. В работах акад. И.И. Судницына [79, 95] содержатся сведения о связи полного потенциала почвенной влаги с влагопотреблением различных культур, позволяющие проводить экологическую диагностику доступности влаги в почве с учетом специфики растений. В наших исследованиях [Смагин, и др., 99, 2006] вслед за классическими работами [Бреслер и др., 87] предложено использовать непосредственно критерий электропроводности порового раствора в состоянии насыщения (Ws) для экологической оценки влияния электролитов на доступность влаги растениям и угнетение их роста.

Подобные исследования были проведены в экспедиции кафедры физики и мелиорации почв в эмирате Дубаи (ОАЭ) [Смагин, и др., 99], где тестировались слоистые конструкции с использованием СПГ по нашим рекомендациям. Они показали, что электропроводность почвенных растворов в этих условиях варьируют в широких пределах от 0,4 до 7 дСм/м при наиболее часто встречающихся величинах порядка 1-3 дСм/м. Соответственно, абсолютные значения осмотического потенциала почвенной влаги будут составлять, прядка 36-108 Дж/кг, что соизмеримо с величинами матричного давления почвенной влаги в исследуемых песчаных почвах. Электропроводность проб грунтовых вод в районе Дубайского и Персидского заливов в отдельных случаях достигала 35-40 дСм/м, или в пересчете на осмотический потенциал (1260-1440 Дж/кг), то есть с энергетической точки зрения была практически недоступна растениям.

К сожалению, ***проблема засоления*** в настоящее время становится актуальной и для крупных городов в зоне гумидного климата (см. главу 1). Как уже отмечалось, активное использование солевых антифризов в условиях г. Москвы в 90^{x} годах ушедшего столетия привело к искусственному засолению городских почв, и серьезным экологическим последствиям в виде гибели большинства древесных насаждений, а в отдельных случаях и травяного покрова (рис.1.6). По данным [Смагин и др., 2006] электропроводность многих участков почвы вдоль крупных магистралей, автобусных остановок, тротуаров г. Москвы достигла 4-8 дСм/м и более, то есть величин типичных лишь для аридных регионов, где засоление

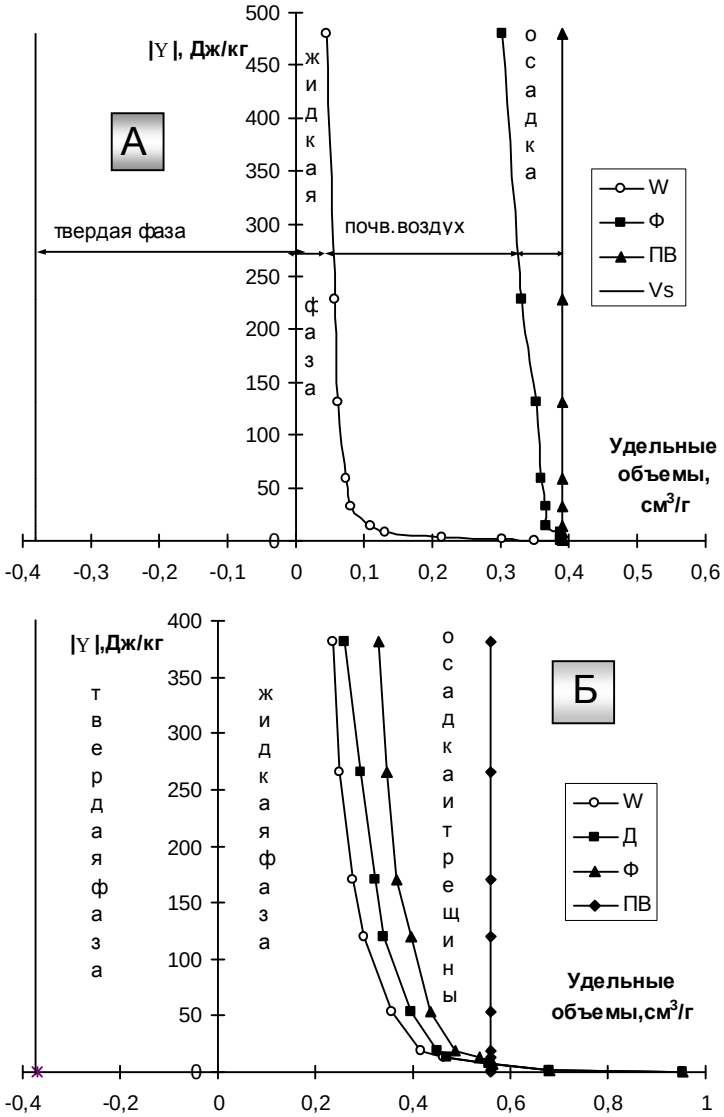


Рис. 2.4. А – диаграмма порового пространства почвы с жесткой структурой (карбонатный песок ОАЭ); Б – диаграмма порового пространства агрегированной набухающей почвы (вертисоль, Тунис) (по [Смагин, Садовникова.,2009]).

является природным бедствием. Сравнение с другими физическими факторами с учетом их пространственной и временной изменчивости по сезонам, показывает, что для исследованных участков фактор искусственного засоления почвы является доминирующей причиной негативного экологического состояния городских почв. Если вероятность переуплотнения составила 56%, неблагоприятного водно-воздушного режима – 16%, то засоленность почвы по критерию электропроводности встречалась в 95% случаев измерений [Смагин и др., 2006]. В настоящее время московские власти осознали эту проблему и в практику ЖКХ постепенно стали внедряться альтернативные методы борьбы с гололедом.

При термодинамической оценке ***технологических свойст***в почвы требуется экспериментальная информация об ОГХ и динамики порового пространства вследствие изменения содержания жидкой фазы. При этом можно наглядно представить данные ОГХ и дифференциальной пористости, выразив соответствующие характеристики пористости через удельные объемы порового пространства, нормированные массой твердой фазы (подход П.Н. Березина [1987]). Для ненабухающих почв с жесткой структурой (грубодисперсные пористые среды) изменение общей пористости возникает при осадке, уплотнении или рыхлении. Трещины в таких почвах встречаются редко (морозобойные, возникающие при обвалах и сдвигах земляных пластов, корневых выворотах...). Поэтому общее поровое пространство (Ф) в таких почвах можно подразделить на две основные категории – удельный объем, занятый влагой ($W/\rho_l=W$) и удельный объем, занятый воздухом ($V_g=Ф–W$). Величина Ф определяется как $Ф=(1/\rho_b–1/\rho_s,)$ где ρ_b, ρ_s – плотности почвы и ее твердой фазы; $1/\rho_s$ – удельный объем твердой фазы. Поскольку при уплотнении величина ρ_b увеличивается, а Ф уменьшается, разность ПВ–Ф дает оценку осадки почвы при этом процессе. Здесь ПВ – исходная полная влагоемкость или максимальный удельный объем пор в рыхлом состоянии почвы.

В нашей разработке [Смагин, Садовникова и др., 99] предложен следующий способ получения диаграмм порового пространства на базе метода равновесного центрифугирования.

Используя данные центрифугирования с нагрузкой, оцениваем величину Ф по переменной $\rho_b = m_s/Sh$ (h – меняющаяся, в зависимости от скорости вращения и, соответственно, потенциала влаги высота образца с массой твердой фазы m_s и площадью S). По известным W, Ф, ПВ строим диаграмму состояния порового пространства (рис. 2.4[А]). По ней легко определить, как изменится соотношение удельных объемов жидкой и газовой фаз в зависимости от содержания влаги и уплотнения почвы при том или ином термодинамическом потенциале. Для набухающих и способных к агрегации почв с переменным поровым пространством помимо усадки возможна фрагментация в горизонтальном направлении – трещинообразование. В составе порового пространства (Ф) выделяются текстурная пористость агрегатных отдельностей (Д) и структурная (межагрегатная) (М) [Березин, 87]. Таким образом, Ф=Д+М; V_g=Ф–W, а разность ПВ–Ф отражает потенциальную усадку и фрагментацию почвы за счет формирования трещин. Для определения текстурной пористости, в зависимости от влажности, используются специальные методы физики почв, сводящиеся к насыщению агрегатов определенных размеров при заданной влажности неполярными жидкостями (например, керосин) [Березин, 87]. Для ориентировочной оценки функции D(W) мы считаем возможным использовать данные по динамике усадки небольших образцов агрегированных почв в процессе центрифугирования под действием сдавливающей нагрузки: $D(W)=1/\rho_b-1/\rho_S$; $\rho_b(h)=m_s/Sh$. Наблюдая за ходом свободной усадки (набухания) этой же почвы на воздухе и контролируя весовым методом влажность образца, определяем Ф. С этой целью удобно использовать прибор Васильева (ПНГ) [Вадюнина, Корчагина, 86]. Имея зависимости $\psi(W)$, D(W), Ф(W), легко построить диаграмму состояния порового пространства (рис.2.4[Б]). В работах П.Н.Березина [85, 87] даны количественные критерии определения слитости и физической деградации почвы на основе анализа соотношения ее удельных объемов, а также более строгие сведения о потенциальной дифференциации порового пространства в зависимости от влагосодержания и оригинальные методы его оценки. Анализируемая в качестве примера почва (вертисоль

Туниса) характеризуется высокой актуальной слитостью и физической деградацией; удельные объемы трещин и пустот в ней в 2-4 раза превышают объемы аэрации текстурного порового пространства (рис.2.4^{Б}).

Характеризуя в целом современную концепцию физического состояния почв, основанную на термодинамическом описании почвы как трехфазной динамической физической системы, отметим ее продуктивность в решение множества прикладных задач почвоведения и смежных дисциплин. От доминирующего ранее в физике почв эмпирического описания взаимосвязи свойств и процессов ее выгодно отличает мощная теоретическая база в виде фундаментальных положений термодинамики и физической химии. И в нашей работе данная концепция принята за основу при разработке и проектировании почвенных конструкций для городских зеленых насаждений.

2.2. Характеристика современных почвенно-гидрофизических моделей и их возможностей для целей конструирования почв (на примере HYDRUS-1D).

Современное проектирование почвенных конструкций предполагает использование точного расчета их функциональных элементов на базе математических моделей энергомассопереноса [Шеин, 2005, Смагин и др., 2008, Смагин, Садовникова, 2009, Wesseling, 2009]. Подобные модели обязательно содержат функциональный блок движения влаги и растворенных веществ в виде систем нелинейных параболических дифференциальных уравнений и численные алгоритмы его реализации [Campbell, 85, Simunek et al., Wesseling, 2009]. В настоящее время в нашей стране и за рубежом создан ряд доступных программных продуктов (SoWaM, HYDRUS), позволяющий производить компьютерные расчеты энергомассопереноса в сложных пространственно-распределенных неоднородных пористых средах с эффектами нелинейного водоудерживания, сорбции, преимущественного транспорта и т.д. В данной работе использована компьютерная среда HYDRUS-1D (США, авторы: J.Simunek, M.Th. van-Genuchten, M. Seina, адрес: www.hydrus2d.com). Программный

продукт представляет собою современное интерактивное средство для компьютерного моделирования движения влаги, тепла и растворенных веществ в многофазной пористой среде. Численные расчеты одномерного движения влаги осуществляется на базе модели Ричардса (2.9), представляющего собою комбинацию модифицированного для ненасыщенной пористой среды закона переноса Дарси и уравнения неразрывности (материального баланса):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K_{(P)} \frac{\partial P}{\partial z} + K_{(P)} \right] \pm I(z,t) , \qquad (2.9)$$

где z, t – вертикальная координата (мм, см, м) и время (с, мин, час, сут), Θ – объемное содержание влаги ($см^3/см^3$), P – ее матричное (капиллярно-сорбционное) давление (см.вд.ст.), $K_{(P)}$ – влагопроводность почвы как функция от давления P (см/с,… см/сут), I(z,t) – локальная функция «источник-сток», отражающая интенсивность поглощения (корни, дренаж) или выделения влаги (подпочвенный полив, боковой приток) в элементарном объеме почвы ($см^3/см^3/с$,…. $см^3/см^3/сут$) Связь давления и содержания почвенной влаги задается основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) (P(Θ)) или ее дифференциальной формой – так называемой дифференциальной влагоемкостью почвы: $S=\partial\Theta/\partial P$. С этой целью во многих современных моделях используется функция ван-Генухтена (2.2), позволяющая также производить оценку зависимости влагопроводности от матричного давления почвенной влаги по данным о коэффициенте фильтрации ($К_ф$), согласно (2.4). Таким образом, для осуществления моделирования массопереноса влаги в первом приближении достаточно лишь двух, определяемых экспериментально величин – ОГХ и $К_ф$ [Шеин, 2005, Смагин, Садовникова, 2009]. В случае неоднородной почвы такая информация должна быть получена для серии слоев (горизонтов) почвы, в пределах каждого из которых допустимо принять неизменность величин ОГХ и $К_ф$. В модели HYDRUS-1D существует встроенная база данных по ОГХ и $К_ф$ различных по гранулометрическому составу почв, однако в случае проектирования конкретных конструкций лучше использовать собственные

экспериментальные данные, после их аппроксимации функцией ван-Генухтена.

В качестве ***граничных условий*** модели используются наиболее походящие по физическому смыслу при имитации тех или иных экспериментов. Так при моделировании свободного гравитационного оттока влаги после предельного увлажнения почвенной колонки и ее изоляции от испарения (оценка НВ) на верхней границе задавалось условие постоянного нулевого потока, а внизу – постоянного нулевого давления (P=0) или сходное условие подвешивания влаги при P<0 и свободного сброса с нижнего торца колонки при P=0 (Seepage face). Вообще же в программе HYDRUS-1D заложены достаточно разнообразные варианты граничных условий, позволяющие задавать постоянными (включая нулевые) давления и (или) потоки (испарение, транспирация), на поверхности почвы (Constant pressure head, Constant flux, Variable Pressure Head, Variable Pressure Head/Flux), а также условия напора (луж) и переменных осадков (испарения) (Atmospheric boundary condition with surface layer, Atmospheric boundary condition with surface run off). На нижней границе к уже перечисленным условиям постоянных или переменных давлений и потоков почвенной влаги добавляются специфические варианты дренажа (Free drainage, Deep drainage, Seepage face, Horizontal drains).

Техника вычислений базируется на соответствующих алгоритмах, составленных на языке ФОРТРАН с использованием серии численных схем и вариантов методов, обеспечивающих сходимость при решении нелинейных задач с сильными контрастами свойств на границах слоев (методы Галеркина, Кранка-Николсона и т.д.). В процессе расчетов можно менять значения интервалов пространственно-временной сетки, весовые коэффициенты и иные параметры численного процесса для получения устойчивых решений (Time information, Iteration Criteria). Так опыт знакомства с системой показал, что при использовании встроенных в базу данных ОГХ и принятых по умолчанию соотношений интервалов временной сетки численные методы дают «срыв» решения задачи гравитационного стекания влаги по прошествии некого критического уровня ($H_{кр}$) мощности профиля почвы (например, 22 см в песке или 228см в суглинке), что рождает у пользователя

иллюзию возникновения феномена наименьшей влагоемкости – постоянной влажности за пределами капиллярной каймы ($H_{кр}$). На самом деле никаких «почвенно-гидрологических констант», кроме разве что влажности насыщения (W_s) и остаточной влажности (W_a) по модели ван-Генухтена в HYDRUS-1D нет, и в качестве равновесного распределения влаги после гравитационного оттока система продуцирует собственно заложенную в нее ОГХ как функцию содержания влаги от высоты профиля. В этом нетрудно убедиться, если немного изменить (увеличить) начальные шаги во временной сетке и соответствующие интервалы для плавающей численной сетки (Initial time step, Minimal time step, Maximal time step) в программе или задать начальные условия насыщения почвы влагой в виде ступеньки с небольшим изменением матричного давления около нулевого значения. Этим можно добиться устойчивости процесса вычисления и придти к равновесному распределению влаги в виде ОГХ для профиля любой мощности. Подобное решение, кстати будет получаться независимо от пути установления равновесия в поле силы тяжести – гравитационный ли отток предварительно промоченной до полной влагоемкости почвы (начальное условие P=0), или капиллярное поднятие с нижней границы (начальное условие P<<0 для всей толщи кроме нижней границы, где P=0).

Для многих специалистов становится очевидным, что такое равновесие в поле силы тяжести весьма отличается от реальности, и это одно из слабых мест моделей типа HYDRUS, основанных на представлениях о непрерывности состояния влаги в почвах (теория потенциалов) в отличие от обсуждаемой в разделе 2.1 отечественной концепции, предполагающей наличие дискретных состояний. Ведь никогда вода в песке спонтанно (без дополнительного разряжения) не поднимется выше 30-50см (критическая величина высоты капиллярного поднятия), тогда как модель допускает подобное поднятие. То же можно сказать и о феномене ВРК (ММВ) – наличии в реальных условиях зоны постоянной влажности в однородных почвах в верхней толще после гравитационного оттока влаги.

Возвращаясь к краткой характеристике используемой в работе модели, отметим, что в ней созданы все удобства

проведения вычислительного эксперимента с понятным и логично построенным интерфейсом. При запуске модели (свободный доступ – через Интернет-ресурс www.hydrus2d.com) перед пользователем возникает рабочее окно, поделенное вертикальной чертой на две части – левую (подготовка к вычислениям – Pre-processing) и правую (результаты вычислений – Post-processing). Для начала работы надо в левой колонке выбрать тип основной задачи (Main processes) – моделирование движения влаги (Water transport), водных растворов (Solute transport), тепла (Heat transport), поглощения воды корнями (Root water uptake), роста корней (Root growth). Очевидно, если выбрать просто движение влаги, модель будет воспроизводить изотермический массоперенос в пористой среде с нулевым корневым стоком. Комбинируя разные задачи, можно усложнить модель движения влаги, включив в нее транспорт тепла, растворов веществ с различными вариантами переноса (бинарная пористость) и взаимодействия с твердой фазой (сорбция), поглощение корнями (транспирацию) на фоне их роста. В данной работе анализируются необходимые и достаточные для проектирования простейшие варианты собственно транспорта влаги в почвах и слоистых конструкциях с граничными условиями в виде потоков и корневого потребления (транспирации).

Переходя к следующему разделу – информация о пространстве (Geometry information), пользователь получает возможность выбрать единицы измерения пространственной координаты (мм, см, м), число характерных слоев, различающихся по свойствам почвы (Number of soil materials), число слоев, для которых будет рассчитываться индивидуальный баланс влаги (Number of layers for mass balance) положение оси координат (Decline from vertical axes), подразумевающее вертикальное, горизонтальное или наклонное одномерное движение, и, наконец, глубину почвенного профиля (Depth of the soil profile).

В следующей рубрике (Time information) задаются необходимые временные характеристики – единицы времени (секунды, минуты, часы, сутки), начальное время (Initial time), которое следует задать равным нулю, если только это не продолжение каких-либо расчетов, конечное время (Final time),

когда расчеты надо завершить, а также параметры временной сетки, влияющие, как уже отмечалось, на устойчивость процесса вычислений – начальный временной шаг (Initial time step), минимальный и максимальный временные шаги (Minimal time step, Maximal time step). В случае переменных граничных условий, например периодических осадков, надо задать соответствующее число периодов, воспользовавшись опцией Time-variable boundary conditions.

Далее в разделе вывода информации (Print information) выбираются значения времени, по прошествии которых пользователь хотел бы получить результаты расчетов. Чтобы не загромождать рисунки, лучше использовать не более 10 подобных характерных времен (Number of print time=10), задавая их либо вручную, либо по умолчанию – через равные интервалы (опция Select print times).

В следующем разделе (Iteration criteria) представляется возможность задать те или иные критерии итерационного процесса, влияющие на длительность, точность и устойчивость получаемых решений. В большинстве типовых задач достаточно использовать установленные по умолчанию характеристики, чтобы не сбить исходную отладку алгоритмов поиска численного решения поставленной начально-краевой задачи.

Наиболее важные с гидрофизической точки зрения разделы (Soil hydraulic property model, Soil hydraulic parameters) содержат информацию о типе используемых функций ОГХ (модели ван-Генухтена в разных модификациях или Брукса-Кури (аналог Кэмпбелла (2.1)) с соответствующими функциями влагопроводности, наличием или отсутствием гистерезиса), а также их численных параметров, задаваемых либо вручную по имеющимся у пользователя данным, либо выбором из имеющейся базы ОГХ и $К_ф$ для 12 градаций дисперсности почвы от песка к глине. Можно также воспользоваться встроенным алгоритмом нейронных сетей для воспроизводства параметров гидрофизических функций по имеющимся данным о физических свойствах почвы в виде процентного содержания трех гранулометрических фракций песка, пыли, глины (sand, silt, clay), а также точечных данных о содержании влаги при давлении 33 кПа (аналог НВ по западной версии) и (или) при 1500 кПа (аналог ВЗ). Параметры ОГХ, например, для функции

ван-Генухтена (2.2) это $Q_s=W_s$ – влажность насыщения (полная влагоемкость), $Q_r=W_a$ – остаточная влажность (количество прочносвязанной воды), Alpha = $1/\psi_e$ – константа, обратная потенциалу барботирования, наклон n, а также значение коэффициента фильтрации ($K_s=K_\phi$) вводятся для каждого выбранного слоя почвы, если их больше чем один (гетерогенная почва). После чего можно сразу перейти к графическому редактору почвенного профиля (Soil profile – graphical editor) и задать там с помощью курсора мощности отдельных слоев с различными гидрофизическими свойствами и их последовательность.

Возвращаясь назад, необходимо выбрать граничные условия транспорта влаги (разделы Boundary conditions, Constant BC), краткий анализ которых уже приводился нами выше. При наличии корневого потребления необходимо выбрать ту или иную подмодель этого процесса и вид культуры из встроенной базы данных. На верхней границе – задать интенсивность потенциальной транспирации (Root Water Uptake), соответствующую оптимуму для данной культуры при наличие в почве доступной влаги. В графическом редакторе профиля (Soil profile – graphical editor) строиться то или иное распределение корневых систем – либо равномерное с постепенным убыванием с глубиной, либо с выбранной пользователем концентрацией (долей) корней в слоях почвы (конструкции) фиксированной мощности.

В завершении постановки начально-краевой задачи следует определить начальные условия в виде распределения капиллярно-сорбционного давления по профилю почвы (h(z)) в рубрике «Soil profile – summary». Для этого можно скопировать имеющийся сложный профиль h(z), например, из таблиц EXCEL или в простейшем случае задать постоянные значения, например, нулевые для имитации полного насыщения влагой (P=h=0). По умолчанию выставляется значение P=h=–100 см.вд.ст., означающее состояние достаточного увлажненной (больше чем НВ) почвы. После окончания подготовки вычислений следует сохранить файл под выбранным пользователем именем в библиотеке системы, используя опцию (Save data) и запустить программу. Обычные несложные задачи

требуют не более 10-30 секунд машинного времени для получения результатов.

Выходная информация размещается в правой колонке рабочего листа под рубрикой «Post-processing». Наибольший практический интерес представляют первые два раздела «Profile information» и «Boundary fluxes and heads», содержащие в графическом виде профильные распределения давления и содержания почвенной влаги (Pressure head, Water content) в заданные моменты времени, а также некоторые сопутствующие характеристики, например, динамику гидравлической проводимости, дифференциальной влагоемкости, потоков влаги в почве и на ее границах (Hydraulic conductivity, Hydraulic capacity, Water flux, Surface flux, Bottom flux….). Три оставшиеся позиции (Soil hydraulic properties, Run time information, Mass balance information) содержат анализ использовавшихся в модели гидрофизических характеристик (ОГХ, функции влагопроводности и т.д.) в графическом виде, а также специфичные данные о динамике характеристик численного процесса (параметров сетки, числа итераций и т.д.) и послойном массовом балансе влаги, вычисляемом с заданной точностью.

Результаты в виде профильных распределений влажности и давления почвенной влаги можно использовать непосредственно, редактируя и копируя соответствующие графики. Если же необходимо проанализировать не графическую, а числовую информацию о зависимости давления и содержания влаги от профильной координаты в интересующие моменты времени, можно, щелкнув правой кнопкой мышки, войти в меню редактирования таблиц данных (Edit chart data) и посмотреть на интересующие значения. Для переноса цифровых данных в электронные таблицы следует из EXCEL войти в программный файл «Direct summary» системы HYDRUS-1D, найти в нем интересующую папку с заданным пользователем названием и открыть там файл основных выходных данных NOD_INF.OUT и (или) файл дополнительных данных, зависящих от времени T-LEVEL.OUT (например потоков на границах) используя опцию «все файлы». Далее при помощи разделителя «фиксированной ширины» разбить данные на интересующие столбцы (скажем «глубина», «давление влаги»,

«содержание влаги»), опустив ненужные, и открыть их окончательно в EXCEL. Если разделитель знаков в EXCEL не совпадает с таковым в HYDRUS-1D, заменить его, используя опцию «найти-заменить», скажем, точку на запятую. Сохранить полученный файл под новым названием как «книгу Microsoft Excel». В дальнейшем с сохраненными числовыми данными можно работать автономно, производя построение графиков, используя статистическую и математическую обработку и иные операции, предусмотренные в таблицах EXCEL и совместимых с ними программных продуктах.

Помимо ***гидрофизических моделей энергомассопереноса*** при проектировании почвенных конструкций с использованием биополимерных материалов необходим учет их возможной ***деструкции*** и зависимости этого процесса от глубины залегания слоя [Смагин и др., 2008, Смагин, Садовникова, 2009]. В простейшем случае с этой целью можно использовать экспоненциальную модель деструкции органического вещества с концентрацией (запасом) (C, г/м^2) и потоком (поступлением) на поверхности (L, г/м^2/год) вида [Смагин и др., 2001]:

$$\frac{dC}{dt} = L - kC , \qquad (2.10)$$

где k, год$^{-1}$ – константа минерализации (биодеструкции), связанная с периодом полураспада вещества: $T_{0,5}=\ln 2/k$. Модель (2.10) имеет следующее аналитическое решение при начальных условиях ($t=0$, $C=C_0$):

$$C_{(t)}=C_p+(C_0-C_p)\exp(-kt), \quad C_p=L/k, \qquad (2.11)$$

При L=0 (отсутствие поступление органических веществ) уравнение (2.11) редуцируется до простого выражения, описывающего биодеструкцию полимера в почве в зависимости от времени:

$$C_{(t)}=C_0\exp(-kt). \qquad (2.12)$$

При более детальных расчетах можно использовать экспериментально определяемые зависимости интенсивностей деструкции от влажности (W) и температуры (T), а также от глубины залегания того или иного слоя конструкции, содержащего биополимер.

Зависимости от ***гидротермических параметров*** носят экстремальный характер с максимумом биологической активности и деструкции органического углерода почвы

приходящимся на область оптимума влажности (обычно 0,6-0,8 W/W_s, W_s – полная влагоемкость или состояние насыщения почвы влагой) и температуры (30°C). Для описания полученных зависимостей в диапазоне варьирования температур от 0 до 30°C и относительной влажности (W/W_s,) предлагается использовать следующие формулы [Смагин, 2005]:

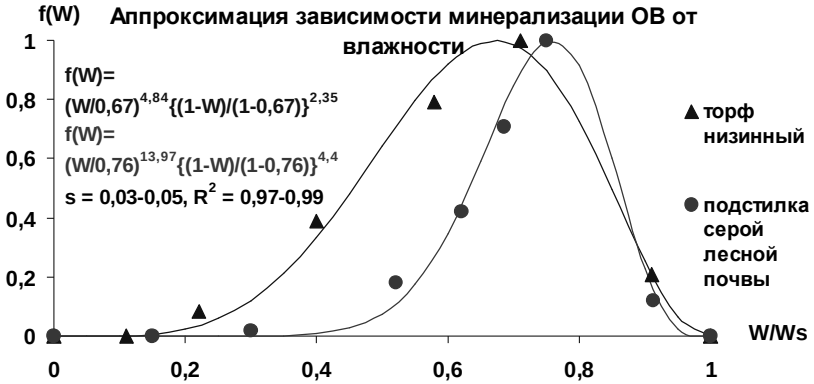
$$U_{(T)} = m_{(T)}U_{max};\ \ m_{(T)} = Q_{10}^{\frac{T - T_m}{10}}, \qquad (2.13)$$

где U_{max} – максимальная интенсивность деструкции при оптимуме, T_m – температура оптимума (30°C), Q_{10} – температурный коэффициент, который в среднем может быть взят равным 2.

$$U_{(W)} = f_{(W)}U_{max};\ f_{(W)} = \left(\frac{W}{W_m}\right)^a \left(\frac{1-W}{1-W_m}\right)^b \qquad (2.14)$$

где W_m =a/(a+b) – влажность экстремума (U_{max}) на кривой зависимости U(W), a, b – эмпирические константы.

Ввиду того, что экспоненциальная функция Q_{10} хорошо известна в биологии и часто используется, остановимся подробнее на оригинальной формуле (2.14), описывающей экстремальный вид зависимости скорости деструкции органических веществ (ОВ) и эмиссии газообразного углерода от влажности. При разработке этой формулы было учтено, что как при недостатке, так и при избытке влаги скорость деструкции должна снижаться и в пределе при нулевой влажности и в состоянии полного насыщения обращаться в ноль. По сути (2.14) является двухпараметрическим уравнением, способным описать сложную нелинейную зависимость $f_{(W)}$. Для удобства используются безразмерные переменные (U/U_{max} и W/W_s) изменяющие свои значения в диапазоне от 0 до 1. Точнее всего проводить оценку эмпирических параметров a и b по экспериментальным данным с помощью пакета прикладных программ нелинейных регрессий в среде «SigmaPlot» методом наименьших квадратов [Смагин, 2005]. Примеры подобной оценки даны на рис. 2.5 (верхняя часть). Однако можно настроить формулу по экспериментальным данным фактически вручную. Для этого необходимо снять с графика влажность экстремума (W_m) и подобрать один лишь параметр a,



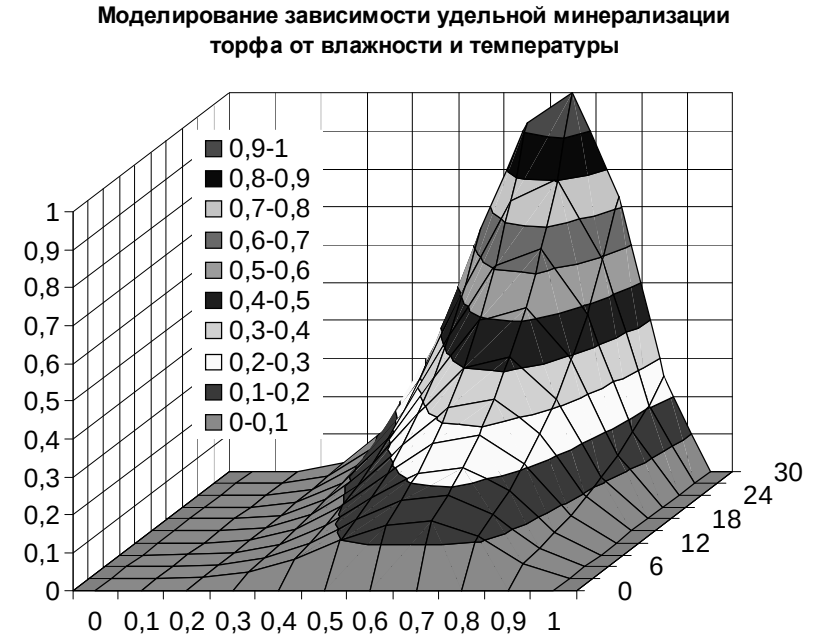


Рис. 2.5. Моделирование функциональных зависимостей минерализации органических веществ почвы от термодинамических условий (по [Смагин, 2005]).

от которого зависит левая граница графика. Чем выше значение а, тем шире диапазон начальных влажностей, при которых

разложение практически отсутствует ($f_{(W)} \rightarrow 0$). Найдя a и W_m, легко рассчитать константу b как $b = a(1 - W_m)/W_m$

Моделирование суммарного вклада температуры и влажности в процесс деструкции органических веществ и выделения газообразного углерода можно осуществить с помощью комбинации функций (2.13-2.14). В простейшем случае достаточно использовать произведение факторов влажности $f_{(W)}$, температуры $m_{(T)}$ и максимального значения биодеструкции (U_{max}) в условиях гидротермического оптимума ($T = T_m$, $W = W_m$), т.е $U = f_{(W)}\ m_{(T)}\ U_{max}$. Пример подобного расчета для низинного торфа приведен в нижней части рисунка 2.5. Количественные закономерности зависимости интенсивности биодеструкции от глубины заложения материала рассмотрены в предыдущей главе (рис. 1.14) и сводятся к экспоненциальному убыванию по мере удаления от поверхности так, что заглубление органического материала на 5-10 см от поверхности гарантирует снижение темпов его разложения в 1,5-2 раза с соответствующим увеличением срока службы почвомодификатора.

Таким образом, мы закончили рассмотрение вкратце использующихся и разработанных в процессе выполнения исследований моделей для проектирования слоистых почвенных конструкций, и в следующем разделе будет приведен анализ экспериментальных методов получения необходимой и достаточной информации для их обеспечения

2.3. Экспериментальное обеспечение моделей и современные методы его получения.

В данной работе наряду с традиционными количественными методами изучения [Вадюнина, Корчагина, 86, Воробъева, 98] были использованы новые авторские методические разработки для экспресс-анализа почвенно-гидрофизических свойств и функций, выполненные на кафедре физики и мелиорации почв ф-та почвоведения и в институте Экологического почвоведения МГУ [Смагин, Садовникова и др., 98, 99, 2006, 2009, Теории и методы…2007]. Все анализы осуществлялись в необходимом числе повторностей (не менее 2-3) с обязательной статистической обработкой получаемых

результатов. Из традиционных химических показателей определялось содержание органического вещества методами Тюрина в модификации Никитина с фотоколориметрическим окончанием и сухого сжигания в токе кислорода экспресс-газоанализаторе АН – 75 [Воробъева, 98]. Для оценки засоления и pH использовались портативные кондуктометры-pH-метры DIST WP4 и HI 98130 Combo фирмы HANNA в соответствии с нашей методической разработкой [Смагин, Садовникова и др., 2006].

Из традиционных физических методов были применены – пикнометрическое определение плотности твердой фазы почв, пирофосфатный вариант пипет-метода для изучения гранулометрического состава, метод трубок для оценки влагоемкости насыпных образцов, метод вегетационных миниатюр для определения влажности завядания [Вадюнина, Корчагина, 86].

Контроль гидротермических параметров (температуры и относительной влажности) в лабораторных и полевых опытах проводился в автоматическом режиме с помощью программируемых электронных микродатчиков «термохрон» DS1921G и «гигрохрон» DS1923, [Смагин, 2005, Смагин, Садовникова и др., 2006], анализ которых будет дан подробнее в отдельной главе, посвященной критериям и средствам мониторинга почвенных режимов. Для оценки скорости фильтрации, капиллярного рассасывания влаги в насыпных почвенных образцах и их композициях с

Рис. 2.6. Схема фильтрационного эксперимента

биополимерами, а также моделирования привноса растворенных веществ (СПГ) и вымывания с поливными водами были проведены колоночные эксперименты (рис.2.6) [Теория и методы…,2007]. Образцы почвы помещались в стеклянные колонки диаметром 3-4 и высотой 10-15см, и в зависимости от цели эксперимента в них подавалась в тех или иных количествах вода или раствор СПГ (0,25-0,5г/л). При изучении скорости рассасывания влаги увлажненный слой создавался в середине трубки, и далее во времени измерялась граница фронта капиллярно движущейся влаги. В обычных фильтрационных экспериментах трубка фиксировалась в вертикальном состоянии в штативе из оргстекла. Под нее устанавливался мерный стаканчик для сбора профильтровавшейся влаги, а на поверхности посредством Мариоттова устройства поддерживался постоянный напор воды. В качестве устройства использовалась перевернутая мерная колба с узким длинным горлышком объемом 250-500мл. Для установки колбы на поверхность образца в трубке ее горлышко вначале обвязывалось тонкой полиэтиленовой пленкой. После переворачивания колбы и соприкосновения ее горлышка с поверхностью почвы в трубке пленка осторожно вытягивалась, и вода поступала в образец под действием силы тяжести. Впитывание воды приводило к попаданию в горлышко пузырька воздуха, который, поступая в колбу, приводил к выравниванию давления и сбросу порции воды адекватного объема. Тем самым эксперимент проводился в полуавтоматическом режиме, поскольку надо было только фиксировать количество профильтровавшейся влаги. По соотношению объема колбы с исходным запасом воды и объема пор в колонке рассчитывалось число тактов (смен порового раствора), в соответствии с [Теория и методы…,2007]. Расчет коэффициента фильтрации ($К_ф$) проводился по данным о количестве (объеме) профильтровавшейся за единицу времени воды (Q, мл/мин) и характеристиках образца – высоте (h, см), площади поперечного сечения (S, $см^2$) и мощности слоя воды (l, см), поддерживающейся на поверхности в соответствии с уравнением Дарси:

$$К_ф = Qh/\{(h+l)S\} \qquad (2.15)$$

Аналогичные опыты проводились не с чистой водой, а с вязкими растворами СПГ с концентрациями 0,25-0,5г/л, превышающими предельную степень набухания (концентрация 1г/л). Эти эксперименты преследовали цель уловить количество СПГ, фиксируемое почвенным слоем определенной мощности при подачи его на поверхность в растворенном (вязкотекучем) виде. В стаканчиках, улавливающих профильтровавшийся раствор, определялось методом Тюрина в модификации Никитина (см. выше) количество органического углерода и по разности между его исходным содержанием в колбе и данной величиной оценивалось количество, фиксируемое почвой. Далее для оценки потенциальной вымываемости СПГ из почвы на поверхность подавалась посредством того же сосуда Мариотта в виде перевернутой колбы чистая вода. В кумулятивном инфильтрате также определялось содержание органического углерода, и по его соотношению с количеством фиксированного в образце углерода геля оценивался вынос с промывными водами. Поскольку данные эксперименты проводились на образцах стекольного кварцевого песка, лишенного исходно каких либо органических примесей, необходимость разделения углерода собственного почвенного органического вещества и углерода гелей здесь отпадала.

Отдельно был организован лабораторный эксперимент с комплексным изучением движения влаги в распределенной пористой среде (кварцевый песок) со слоями торфяного почвомодификатора и СПГ в верхней части профиля – то есть на макетах слоистых почвенных конструкций малого размера. С этой целью сосуд из прозрачного оргстекла в форме параллелепипеда (13х13х50см) со встроенными в стенку керамическими свечами тензиометров и пластмассовой линейкой с гидротермическими датчиками «термохрон» и «гигрохрон» был засыпан тонкозернистым кварцевым песком в воздушно-сухом состоянии с фиксацией массы на электронных напольных весах. В верхней части сосуда на поверхность песка был нанесен 10см слой смеси песка с 0,2% гидрогелем в предварительно набухшем состоянии, который в свою очередь был засыпан сверху 5см слоем сухого песка. Для приготовления смеси песка с гидрогелем в расчетное количество дистиллированной воды, соответствующее 20% влажности для

массы 10см слоя песка был высыпан сухой гидрогель в количестве 0,2% от массы 10см слоя песка. После свободного набухания в воде гель был смешан с вмещающим сухим песком и полученная влажная композиция использована в качестве рабочего слоя лабораторной почвенной конструкции. Во втором варианте макета почвенной конструкции малого размера вместо слоя СПГ использовался аналогичный 10см слой 100% торфяного почвомодификатора «Arid Grow».

Изучение эвапотранспирации и физического испарения и эвапотранспирации, проводилось посредством контроля динамики массы соответствующих сосудов с образцами почв (почвенных конструкций) и растений. Сосуды известного объема (V) и площади поперечного сечения (S) изготавливались из подручных средств (пластиковые ведра, стаканы). Зная убыль массы сосуда в единицу времени ($\Delta m/\Delta t$, г/сут) и площадь его поперечного сечения ($S, см^2$), легко было рассчитать соответствующие (эвапо)транспирационные потери q, мм/сут:

$$q = 10(\Delta m/(S\Delta t), \qquad (2.16)$$

где 10 – переводной коэффициент при использовании единиц потока мм/сут.

Для оценки потенциальной биодеградации СПГ и снижения его эффективности был проведен пятимесячный инкубационный эксперимент. Образцы стекольного кварцевого песка и полиминеральной пустынной песчаной почвы Каракумов с гидрогелем в дозах от 0,05 до 0,2% выдерживались в термостатах при постоянных температурах 20, 30 и 37^{o}C, имитирующих разные условия биодеструкции в гумидной и аридной климатических зонах. Влажность образцов при этом поддерживалась оптимальной для разложения и составляла порядка 20%. Перед закладкой эксперимента и по его окончании в образцах определялось содержание органического углерода (см. выше), а также оценивалась ОГХ.

Получение ОГХ и функции влагопроводности в исследовании проводилось разными методами, включавшими как традиционные, так и новые оригинальные разработки в данной области. На первых этапах исследования при исследовании ОГХ грубодисперсных пористых сред в виде ряда фракций кварцевого песка, обладавших малой водоудерживающей способностью были применены

капилляриметрические установки нулевого типа с максимальным разряжением до 50-55кПа (pF≈2,7) [Вадюнина, Корчагина, 86, Теории и методы.., 2007]. При исследовании ОГХ и функций влагопроводности собственно почв, кондиционированных биополимерами, вначале использовался тензиометрический метод в зондовом варианте, позволявший вести измерения эквивалентного давления почвенной влаги до 80 кПа (по модулю) [Вадюнина, Корчагина, 86, Смагин, Садовникова, 94]. Впоследствии нами был предложен метод равновесного центрифугирования для сравнительного анализа ОГХ и функции влагопроводности почв под воздействием природных и синтетических биополимеров [Смагин и др., 98, 99, 2004], составивший методическую основу данного исследования. Он позволил существенно (до 600-1000 кПа) расширить границы традиционных определений капиллярно-сорбционного потенциала, использовать небольшие образцы (10-20г), проводить анализ на массовом материале в повторностях с высокой точностью и репрезентативностью результатов. Поскольку этот метод малоизвестен, и в редкой литературе можно найти весьма сильно различающиеся способы расчета потенциала (давления) влаги в поле центробежной силы, мы приведем ниже собственную методическую разработку, использующуюся в настоящем исследовании с оригинальной моделью кинетики удаления почвенной влаги, позволяющей не только определять потенциал и равновесную влажность, но и оценивать в нестационарном режиме функцию влагопроводности почв [Смагин и др., 98, 99].

Метод равновесного центрифугирования. Проблема экспериментального получения ОГХ как базового показателя эколого-физического состояния почв, несмотря на длительную предысторию, далека до завершения. Традиционно используемые с этой целью тензиометрические методы, как уже упоминалось выше, ограничены сравнительно небольшим диапазоном измерений капиллярно-сорбционного потенциала от 0 до 50-80 Дж/кг (кПа) по абсолютной величине. Данные гигроскопического метода определения «верхнего» (сорбционного) участка ОГХ (точнее полной гидрофизической характеристики, поскольку метод равновесия с водяными парами оценивает полный, а не матричный потенциал) обычно

не превышают величин – 2700-2800 Дж/кг, соответствующих максимальной гигроскопической влажности почвы. В результате между тензиометрическим и сорбционным участками остается обширная область, которая не определяется вообще из-за трудоемкости или невысокой точности соответствующих методов (мембранный пресс, психрометрия, криоскопия), либо оценивается расчетно-экспериментальным способом [Воронин, 84]. В целом оба основных направления физики почв – исследование состояний почвенной физической системы и ее динамических режимов нуждаются в точном, репрезентативном, экспрессном и простом методе определения ОГХ, позволяющем изучать эту характеристику в естественном диапазоне варьирования на массовом материале. Таким методом, по нашему мнению, может служит центрифугирование – незаслуженно забытый и редко употребляемый в почвоведении анализ водоудерживающей способности [Смагин и др.,98, 99].

В методе центрифугирования удаление влаги из образца почвы происходит под действием центробежной силы. Развиваемое при этом давление на жидкую фазу можно определить по следующей формуле [Смагин и др., 2008]:

$$P = \frac{\rho_l \omega^2}{2}(R_2^2 - R_1^2) \qquad (2.17)$$

где ω – угловая скорость вращения, $R_{1,2}$ – расстояния от оси вращения до начала образца и до свободной поверхности удаляемой жидкости соответственно; ρ_l – плотность жидкости.

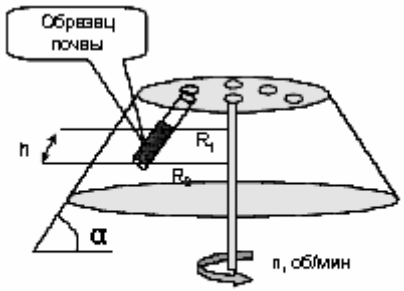


Рис. 2.7. Схема метода равновесного центрифугирования

Приведенное уравнение (2.17) получается следующим образом [Смагин и др. 98]. Давление, оказываемое на влагу в центрифугируемом образце, есть отношение силы (F), действующей на жидкость, к площади ее поперечного сечения (S): P = F/S. Учитывая, что сила есть

масса воды в образце (m_l), умноженная на центробежное ускорение (a), а площадь воды в цилиндрическом образце равна ее объему (V_l), деленному на высоту (h), имеем $P = m_l ah/V_l$. Поскольку $a = \omega^2 R$ (R – радиус вращения от оси до центра масс образца), а $m_l/V_l = \rho_l$, получаем:

$$P = \rho_l \omega^2 Rh \qquad (2.18)$$

Принимая во внимание изменение радиуса с высотой образца, находим:

$$P = \int_{R_1}^{R_2} Pdh = \int_{R_1}^{R_2} \rho_l \omega^2 Rdh = \frac{\rho_l \omega^2}{2}(R_2^2 - R_1^2), \qquad (2.19)$$

что и соответствует формуле (2.17).

Часто конструкция центрифуги предполагает наклонное расположение образца к оси вращения, поэтому в формулы (2.17-2.19) необходимо ввести поправочный множитель ($\cos\alpha$), где α – угол между горизонталью и центральной осью симметрии образца. В случае горизонтального ротора крестовины $\alpha = 0°$ и $\cos\alpha = 1$. Для тихоходных режимов центрифуги следует учитывать гравитационную составляющую потенциала ($\Psi = -gh\cdot\sin\alpha$, h – высота образца). Угловая скорость вращения (ω) по данным о числе оборотов центрифуги в минуту (n) рассчитывается по формуле $\omega = \pi n/30$, $[\omega] = c^{-1}$. Если известна относительная сила центрифугирования или так называемый фактор разделения ($F = \omega^2 R/g$), то величину P легко определить прямой подстановкой в формулы (2.17-2.19). Приведем расчетные формулы для определения давления (матричного потенциала) почвенной влаги методом центрифугирования с учетом используемых в уравнениях (2.18) и (2.19) констант и размерностей физических величин [Смагин и др., 98, 99]:

точечный образец:

$$P[\text{кПа}] = \psi_m\ [\text{Дж/кг}] = -(0{,}011 n^2 R\cos\alpha + g\sin\alpha)h, \qquad (2.20)$$

распределенный образец:

$$P[\text{кПа}] = \psi_m\ [\text{Дж/кг}] = -(0{,}0055 n^2 (R^2_2 - R^2_1)\cos\alpha + gh\sin\alpha), \qquad (2.21)$$

[n] – об./мин, [R], [h] – м; знак (–) ставится по определению потенциала почвенной влаги.

Анализируя формулы (2.20 и (2.21), нетрудно убедиться, что, меняя высоту образца h или расстояние от верхней части образца до свободной поверхности удаляемой жидкости ($R_2 - R_1$), а также скорость вращения центрифуги, можно исследовать ОГХ почвы практически во всем диапазоне ее варьирования. Например, на ультрацентрифуге Лебедева (1936) (n = 50000 об/мин, R_1 = 1,0, R_2 = 1,75см) достигается предельная величина ψ_m =–2835 Дж/кг, соответствующая потенциалу при максимальной гигроскопической влажности. Для обычной лабораторной центрифуги типа ЦЛС-3, n варьирует от 100 до 6000 об/мин, а диапазон измерения потенциала почвенной влаги при среднем радиусе вращения R = 10 см и высоте образца h = 1-3 см составляет $-650 < \psi_m < -0{,}5$Дж/кг.

При необходимости можно параллельно оценить осмотическое давление (потенциал) отделяемого в процессе центрифугирования раствора с помощью осмометра, криоскопии или по данным о его концентрации (С) и электропроводности (ЕС) [Campbell,85]:

$$\psi_{os} = \psi_0 ПВ/W; \qquad (2.22)$$

$\psi_0 = -CRT/M$ (неэлектролит), $\psi_0 = -36$ ЕС (электролит), где R - универсальная газовая постоянная [Дж/моль К], М - молярная масса [г/моль], [С] = г/м^3, [Т] = К, [ЕС] = дСм/м. Зависимость электропроводности порового раствора от влажности почвы (ЕС(W)) сама по себе является информативной характеристикой состояния влаги и может быть использована для оценки почвенно-гидрологических констант – максимальной адсорбционной и максимальной молекулярной влагоемкостей [Смагин, 2003].

Центрифугирование позволяет моделировать потенциал нагрузки вышележащих слоев почвы ($\psi_н$), если на поверхности образца установлен аппликатор определенной массы (m) и поперечного сечения [Nimmo et al., 94]:

$$\psi_н = m\omega^2 R/S \qquad (2.23)$$

В целом, помимо матричного (капиллярно-сорбционного) потенциала (формулы (2.20) и (2.21)), центрифугирование дает возможность определить по отдельности и другие составляющие полного потенциала влаги в почве, что также является серьезным преимуществом этого метода.

Наиболее перспективным вариантом определения ОГХ с помощью центрифуги будет, по-видимому, аналог метода высоких колонн (по Лебедеву), реализованный не в гравитационном, а в более мощном центробежном поле. Это позволяет существенно сократить размеры колонн, пропорционально фактору разделения ($F=\omega^2R/g$), показывающему во сколько раз центробежное поле сильнее гравитационного. Для обычных лабораторных центрифуг с радиусом вращения порядка 0,1м и скорости 500-5000 об/мин подобное усиление может быть 30-3000 кратным. Тогда вместо длинных почвенных колонн, достигающих согласно Роде [1952] нескольких метров, достаточно использовать обычные центрифужные стаканы (порядка 0,1 м) с увлажненной до полной влагоемкости почвой. В результате при фиксированной скорости вращения центрифуги можно из одного эксперимента (а не серии опытов) получить практически непрерывную кривую ОГХ, анализируя влажность почвы в центрифужной пробирке в зависимости от расстояния до ее дна. Для поддержания на нижней границе колонны нулевого капиллярно-сорбционного давления пробирка должна устанавливаться перфорированным дном на гигроскопический материал (вату, поролон), пропитанный водой. По прошествии характерного времени эксперимента (2-4 часа, согласно [Смагин и др., 98]) можно либо распилить пластмассовую пробирку на отдельные фрагменты и, взвешивая их, узнать подобное распределение влажности, либо вынимать аккуратно порции почвы, начиная от верха и заканчивая наиболее увлажненным содержимым у дна. В перспективе следует использовать составные пробирки из термостойкого материала, которые по окончании опыта можно будет разъединять и после взвешивания сушить фрагменты (секции) пробирки с почвой для определения влажности.

Расчеты по формуле (2.21) давления почвенной влаги в распределенном почвенном образце в зависимости от переменного радиуса R_1, который, очевидно, зависит от высоты образца h как $R_1=R_2-h\cos\alpha$, показывают, что при максимальной скорости вращения лабораторной центрифуги типа ЦЛС-3 (Россия) в 6000 об/мин, у вершины 10 см почвенной колонки разовьется давление порядка 1500 кПа (15атм), то есть можно достичь таким образом давления, соответствующего влаги

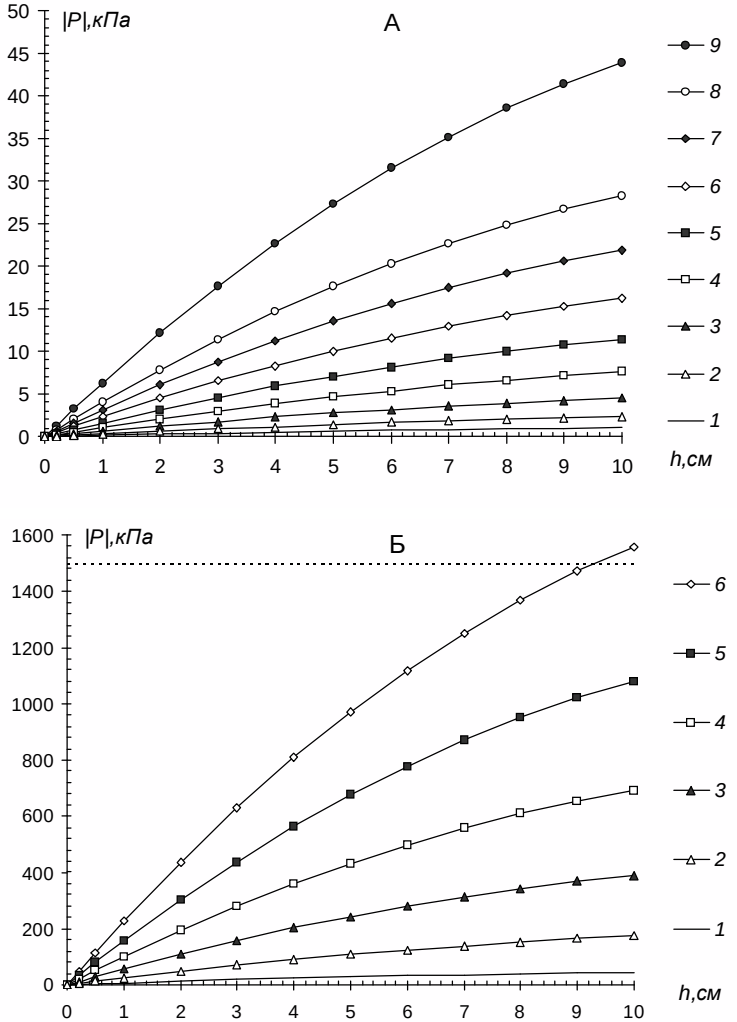


Рис. 2.8. Расчетные кривые зависимости давления почвенной влаги от высоты почвенной колонки для лабораторной центрифуги ЦЛС-3. Обозначения: А – малые скорости центрифугирования: №№ 1-9, соответственно 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 об/мин; Б – средние и высокие скорости центрифугирования: №№ 1-6, соответственно 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 об/мин. Пунктирная линия – давление, соответствующее влаге завядания (1500 кПа).

завядания (рис.2.8). Вместе с тем на расстоянии h всего лишь 2мм от свободной поверхности воды (2мм слой у дна пробирки) при такой скорости вращения давление будет равным порядка 40-50 кПа. Единичный эксперимент с такой скоростью вращения, очевидно, представляется целесообразным лишь для изучения ОГХ тяжелых почв и грунтов с высокой водоудерживающей способностью. В песках распределение влаги по колонке будет почти однородным, так как уже при 40 кПа отожмется практически вся капиллярная влага. Вместе с тем, понизив скорость вращения до 1500 об/мин, можно получить подходящий для ОГХ песков градиент центробежного поля от ≈3 кПа у дна до ≈100 кПа у вершины 10 см почвенной колонки. Тем самым, производя один лишь центрифужный эксперимент с указанной скоростью вращения, можно определить практически непрерывную кривую ОГХ в диапазоне 3-100 кПа, существенно сократив время и затраты на анализ. Для получения ОГХ в диапазоне более высоких абсолютных значений давлений от 200 до 1500 кПа, очевидно, следует провести дополнительный эксперимент с образцом такой же почвы в 10 см колонке на максимальной скорости вращения центрифуги в 6000 об/мин (рис.2.8).

Наряду с традиционно используемыми в гидрофизике ОГХ в виде кривых иссушения, разработка теоретически позволяет получать ветвь увлажнения (аналог капиллярной каймы) почвы, если помещать ее в гнезда центрифуги с водой на дне и с жесткой пружиной, подобранной таким образом, чтобы при сжатии на заданной скорости вращения нижняя поверхность образца погружалось бы в свободную воду [Смагин, Садовникова, 2009]. Тем самым становится возможным экспериментальное исследование гистерезиса ОГХ в широком диапазоне варьирования давлений почвенной влаги. Также предлагаемая модификация метода равновесного центрифугирования, на наш взгляд, будет особенно перспективной для информационного обеспечения и настройки моделей массопереноса влаги типа HYDRUS, где, по сути, заложены ОГХ в виде распределения влаги по высоте в однородной почвенной толще (колонне) фиксированной мощности. Ведь именно такое равновесное распределение,

тождественное форме ОГХ воспроизводят эти модели при условии свободного гравитационного оттока влаги и нулевого потока на верхней границе профиля (рис. 2.2, 2.3).

Помимо определения термодинамических характеристик водоудерживания (ОГХ), метод центрифугирования может быть использован и для оценки ***функции влагопроводности почвы***. С этой целью нами была разработана кинетическая релаксационная ***модель процесса центрифугирования влаги*** в пористой среде, которая позволяет точно определить характерное время дренирования образца, а также рассчитать равновесную влажность и функцию влагопроводности (ненасыщенной гидравлической проводимости) [Смагин и др.,98]. Заметим, что в большинстве руководств по исследованию потенциала почвенной влаги тем или иным методом вопрос о времени достижения равновесия в системе почва-вода обходится стороной. Вместе с тем очевидно, что если необходимое время не выдерживается, результаты анализа ОГХ получаются завышенными. По мнению И.И. Судницына и Р.И. Зайцевой [1993] в этом кроется одна из причин несоответствия между данными, полученными различными методами определения ОГХ. Личный опыт позволяет заключить, что для достижения равновесия в песчаных почвах при их анализе тензиометрическим или капилляриметрическим методами часто требуется не меньше 2-3 сут, так как ненасыщенная гидравлическая проводимость этих сред может быть на несколько порядков меньше таковой в тонкодисперсных грунтах. При этом изменения во влажности дренируемых образцов, как правило, невелики ($n \cdot 10^{-1}$% в сутки), что создает ложное впечатление о наступлении равновесия в системе. Аналогичные проблемы возникают и при использовании метода центрифугирования, когда незначительная убыль в массе образца сохраняется продолжительное время, что затрудняет диагностику равновесия. Во избежание неопределенности мы предлагаем использовать для соответствующих расчетов кинетическую модель центрифугирования, речь о которой пойдет ниже. Зависимость остаточной влажности образца (W) от времени (t) при постоянной скорости вращения центрифуги хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией, в связи

с чем для описания процесса центрифугирования можно выбрать линейную релаксационную модель вида:

$$\frac{dW}{dt} = k(W_p - W) \qquad (2.24)$$

где W_p – равновесная влажность, k – кинетическая константа релаксации [Смагин, Садовникова и др., 98].

Если влажность почвы больше, чем равновесная, соответствующая данному потенциалу (скорости вращения центрифуги), то образец будет иссушаться ($dW/dt < 0$); в противном случае ($W < W_p$) происходит увлажнение образца ($dW/dt > 0$) при наличии необходимого для этого резервуара с водой. Стационарное состояние (динамическое равновесие) в системе наступает при условии $W = W_p$ ($dW/dt = 0$). Решением модели (2.24) служит следующая зависимость:

$$W_{(t)} = W_p + (W_0 - W_p)\exp(-kt) \qquad (2.25)$$

где W_0 – начальная влажность образца на данном этапе центрифугирования.

Для оценки параметров уравнения (2.24) по экспериментальным данным (W(t)) можно применить готовые алгоритмы нелинейной аппроксимации данных, например, программу «Sigma-Plot», которая неоднократно использовалась в подобных целях в нашей работе. Для тех, у кого отсутствует такая программа, можно облегчить задачу, если произвести замену экспоненты полиномом: $\exp(-x) \approx 1 - 0{,}9664x + 0{,}3536x^2$ с наибольшей абсолютной ошибкой 10^{-3} в интервале $0 \leq x \leq \ln 2$ [Смагин и др., 98]. Условие ($kt \leq 1n2$) при центрифугировании почвенных образцов, как правило, выполняется; в отдельных случаях можно ввести в уравнение (2.25) дополнительный сомножитель $\exp(\alpha)$ ($\alpha < kt$), понижающий величину kt до требуемого значения. После замены экспоненциальной функции, уравнение (2.25) приобретает вид:

$$W_{(t)} \approx at^2 - bt + c, \qquad (2.26)$$

где $c = W_0$, $a = 0{,}3536(W_0 - W_p)k^2$, $b = 0{,}9664(W_0 - W_p)k$.

Параметры a, b, c находят по экспериментальным данным W(t), методом наименьших квадратов по стандартной программе аппроксимации полиномом $y = ax^2 + bx + c$, электронных таблиц EXCEL. По известным параметрам легко определяются искомые величины:

$k = 2{,}733a/b$; $W_0 = c$; $W_p = c - a/(0{,}3536k^2)$ или

$$W_p = c - b/0{,}9664k \qquad (2.27)$$

Изложенная выше модель кинетики центрифугирования позволяет оценить ***функцию влагопроводности почвы***. Из феноменологического уравнения переноса влаги применительно к условиям центрифугирования имеем [Смагин и др., 98]:

$$q = \frac{K_ц}{h}(P_ц - P_w) = \frac{m_S\, dW}{\rho_l S dt} \qquad (2.28)$$

где q – поток воды; $P_ц$, P_w – давление центрифугирования и давление влаги в образце в данный момент времени; $K_ц$ – наименьшая ненасыщенная проводимость, соответствующая $P_ц(W_p)$; h, S – высота и площадь поперечного сечения образца, m_s – масса твердой фазы. Объединяя это уравнение с моделью (2.24, 2.25), получаем:

$$K_ц = \frac{k(W_0 - W_p)e^{-kt}h^2 r_b}{100 r_l (P_ц - P_w)} \qquad (2.29)$$

или при t = 0

$$K_ц = \frac{k(W_0 - W_p)h^2 r_b}{100 r_l (P_ц - P_0)} \qquad (2.30)$$

где W_0, P_0 – начальное содержание влаги и ее давление в образце, $\rho_b = m_s/Sh$ – плотность почвы; [P] = см. водн. ст.; [h] – см, [k] – $сут^{-1}$; [K] – см/сут.

Реализация метода центрифугирования в данном исследовании проводилось в основном на базе серийной отечественной центрифуги типа ЦЛС-3. Центрифуга снабжена двумя сменными роторами (угловым и крестовиной) и набором центрифужных пробирок (стаканчиков), выполненных из пластмассы. Общее число анализируемых одновременно образцов соответствует емкости ротора (8-32 шт). Время, необходимое для достижения равновесной влажности в образце, зависит от его гранулометрического состава, влагопроводности, энергии водоудерживания и соответственно скорости вращения центрифуги. Основное количество (80-90%) влаги удаляется достаточно быстро (от 15-30 минут до нескольких часов), однако для достижения полного равновесия может потребоваться существенно большее время, в связи с чем

рекомендуется использовать расчетный метод определения истинной равновесной влажности с помощью предложенной выше кинетической модели.

Перед началом анализа необходимо измерить исходную массу пробирки с фильтрами и крышкой-аппликатором (m_0) и ее внутренний диаметр (d). По нему легко рассчитать площадь поперечного сечения $S = \pi d^2/4$. После помещения образца в пробирку, его надо насытить водой в течение суток (в отдельных экспериментах можно исследовать монолиты с естественной влажностью после поливов или обильных осадков). Для ускорения насыщения и дегазации образца рекомендуется эту процедуру проводить в вакуумных шкафах или эксикаторах. Насыщенный образец взвешивается и измеряется его высота (h_0). Взвешивание проводится на точных электронных весах (до 3 знака). Замер высоты образца осуществляется штангенциркулем с точностью до 0,5 мм. Насыщенные образцы в перфорированных со дна пробирках помещаются в стандартные пластмассовые держатели к центрифуге ЦЛС-3, подготовленные к определению потенциала почвенной влаги. Подготовка заключается либо в перфорации гнезд держателя для свободного стока удаляемой влаги в гнездо ротора, либо в их частичном заполнении пористым материалом-подкладкой, аккумулирующим отгоняемую воду. Держатели уравновешиваются (до 1 г) и устанавливаются в угловой ротор центрифуги. Ротор закрывается герметичной крышкой и задается минимальная скорость вращения (n=100 об/мин). При грубом тахометре рекомендуется контролировать эту скорость визуально с помощью метки на стенке ротора и секундомера. Полезно производить несколько последовательных измерений убыли массы образца при центрифугировании с заданной скоростью, что позволяет определить истинную равновесную влажность и функцию влагопроводности почвы (см. выше).

По завершении опыта с данной скоростью вращения (достижении равновесия поля центрифуги с силами, удерживающими влагу в почве), измеряется масса (m_i) и высота образца (h_i), после чего приступают к следующему этапу центрифугирования, например, при n=200 об/мин и так дальше вплоть до максимальных величин n=6000 об/мин. На начальных этапах $0 < n < 1000$ об/мин целесообразно повышать скорость

вращения через каждые 100-200 об/мин (например 100, 200, 400, 600, 800, 1000). В дальнейшем шаг можно увеличить до 1000 об/мин.

В конце эксперимента, после скорости вращения 6000 об/мин, пробирка с почвой взвешивается (m_{6000}) и сушится при 105°С для определения остаточной влажности (W_{6000}) и массы абсолютно сухой почвы (m_s). Если пробирки изготовлены из пластмассы, лучше переложить их содержимое в стеклянные бюксы для определения влажности и потом рассчитать массу абсолютно сухой почвы при известной массе пробирки (m_0) как $m_s=100(m_{6000}–m_0)/(100+W_{6000})$. Расчет влажности на остальных этапах центрифугирования и отдельных кинетических стадий этого процесса осуществляется по формуле:

$$W\% = [(m_i – (m_s+m_0))/ m_s]100, \qquad (2.31)$$

где m_i – масса пробирки с образцом на данном этапе центрифугирования. Соответствующее значение давления влаги находится в зависимости от скорости вращения центрифуги по приведенным выше формулам (2.20-2.21).

Приведем конкретный пример расчетов. Конечная влажность почвы после 6000 об/мин, определенная термостатно-весовым методом составила 12,6%. Масса пустой центрифужной пробирки с фильтром равна 3,310г, а масса с почвой на последнем этапе центрифугирования – 6,692г. Рассчитаем равновесную влажность на предыдущем этапе (5000 об/мин), если масса почвы с пробиркой m_i =6,732г. Вначале определим количество абсолютно сухой почвы m_s = (6,692–3,310)(100/(100+12,6) = 3г. Теперь можно найти влажность при 5000об/мин:W=[(6,732–(3+3,310)/3]100=14,1%.Соответствующее значение давления почвенной влаги находим по формуле (2.20) при известных R=0,11м, $\alpha=43^o$, h=0,02м : ψ_m [Дж/кг] = P [кПа] = – $(0{,}011\cdot5000^2\cdot0{,}11\cos43^o + 9{,}8\cdot\sin43^o)\cdot0{,}02$ =–443 Дж/кг или кПа.

Изложим ход работы для варианта распределенных образцов (комбинированный колоночно-центрифужный метод) с получением практически непрерывной кривой ОГХ. Насыпные образцы или монолиты почвы помещаются в предварительно взвешенные центрифужные пробирки высотой 10 см и диаметром 1 см с перфорированным дном. Параллельно берется проба на влажность почвы в исходном (воздушно-сухом

или естественном) состоянии. Взвешенные пробирки с образцами почвы устанавливаются в емкости с водой (лабораторные стаканы) и после стадии предварительной капиллярной подпитки со дна (определяется по увлажнению поверхности образца) в стаканы добавляется вода вровень с поверхностью образцов для полного насыщения почвы. После взвешивания пробирки с образцами устанавливаются по 4 штуки в лабораторные центрифужные держатели, на дно которых кладется кусочек ваты или поролона, смоченный водой. Далее по графику А (рис. 2.8) выбирается скорость вращения центрифуги, необходимая для получения ОГХ в начальном диапазоне давлений не более 50 кПа, соответствующем тензиометрической области. Часть образцов центрифугируется на данной скорости вращения в течение 2 (легкие) – 4 (тяжелые почвы) часов, по прошествии чего пробирки распиливают (развинчивают, если они составные) на отрезки 3-10мм, взвешивают ($m_в$) и сушат до постоянной массы (m_s) при 105^{o}C. Можно, предварительно разметив прозрачную пластмассовую пробирку на сегменты, просто аккуратно извлекать порции почвы с каждой глубины и переносить в стеклянные сушильные стаканчики. По формуле, аналогичной 2.31: $W=100\cdot(m_в - m_s)/(m_s - m_f)$, где m_f – масса пустого фрагмента пробирки или сушильного стаканчика, находят значение соответствующих влажностей в профиле почвенной колонки. Таким же образом поступают с другой серией образцов если требуется получить ОГХ в диапазоне более высоких абсолютных величин давлений почвенной влаги, вплоть до 1500 кПа, выбирая предварительно по графику Б (рис. 2.8) соответствующую скорость вращения. Очевидно, что графики 1А, 1Б, служат лишь для ориентировочной оценки (выбора) условий эксперимента, а точные значения давлений почвенной влаги в исследуемых слоях распределенного образца (колонки) находятся по уравнению 2.21.

Далее по данным о массе пустой пробирки (m_0), исходной массе почвы в пробирке ($m_{вл}$) при первоначальной влажности (W_0) и массе насыщенной почвы в пробирке ($m_н$) оценивается полная влагоемкость:

$$ПВ\% = 100\left(\frac{m_н - 100\,m_{вл}/(100+W_0)}{100\,m_{вл}/(100+W_0) - m_0}\right) \qquad (2.32)$$

По формуле (2.21) с учетом зависимости $R_1=R_2-h\cos\alpha$ рассчитывается давление влаги в зависимости от расстояния от дна пробирки для используемых скоростей вращения центрифуги. Эти данные составляют одну из координат ОГХ. Значения по другой оси функции, очевидно, находятся как весовые влажности (W) почвенных фрагментов, соответствующие их той или иной высоте от дна пробирки (h) (см. выше). Зная диаметр и высоту сегмента пробирки, а также массу фрагмента почвы после сушки, легко определить плотность и пересчитать при необходимости весовую влажность в объемное содержание.

На рисунке 2.9 приведены выборочные результаты экспериментов, иллюстрирующие возможности нового колоночно-центрифужного метода на примере трех сильно различающихся по дисперсности и физическому состоянию образцах – кварцевом стекольном песке, среднесуглинистом черноземе обыкновенном (Краснодарский край), горизонт А (20-30см) и торфяно-болотной низинной почвы (Московская обл.), горизонт Т (10-20см). Данные были сгруппированы следующим образом: стадии вращения центрифуги при 200-400 об/мин (квадратные символы), при 1000-2000 об/мин (ромбы) и при 6000 об/мин (треугольники). Окраска символов соответствовала повторности эксперимента: черный фон – первая повторность, бесцветный – вторая. В случае четырехкратной повторности данные попарно усреднялись.

Как видно из рисунка для всех исследованных образцов метод позволил получить типичные кривые ОГХ в виде непрерывной последовательности точек в широком диапазоне абсолютных величин давлений почвенной влаги от 0 до 1500 кПа. Тем самым удалось решить важную с теоретической и практической точек зрения задачу оценки ОГХ единым экспресс-методом в пределах естественного варьирования влажности от полной влагоемкости до влаги завядания (ВЗ). При сравнительном анализе результатов проявилась специфика исследуемых образцов. Наименьшая водоудерживающая

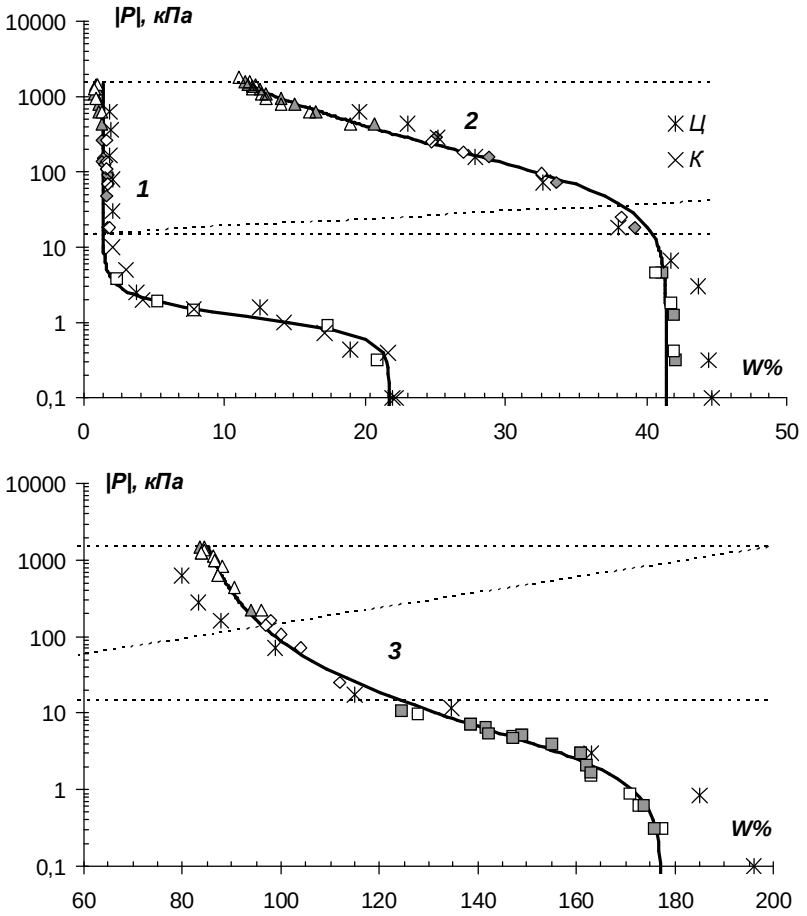


Рис. 2.9. Примеры ОГХ исследуемых образцов (комбинированный колоночно-центрифужный метод). Обозначения: 1 – мономинеральный кварцевый песок, 2 – среднесуглинистый чернозем обыкновенный, 3 – торфяно-болотная низинная почва; кривые – аппроксимация данных моделью ван-Генухтена; пунктирные линии: верхняя – ВЗ (давление 1500 кПа), нижняя и средняя – КВ и НВ в виде секущих по Воронину [1986]; Ц – метод равновесного центрифугирования, К – метод высоких колонн, остальные обозначения – см. текст.

способность (по весовому содержанию влаги), как и ожидалось, была у кварцевого песка, наибольшая – у органогенной торфяной почвы; чернозем занимал промежуточное положение (рис. 2.9). Для сравнительной оценки дифференциальной влагоемкости был использован метод секущих А.Д. Воронина хотя его можно признать лишь условно допустимым в случае грубодисперсного и органогенного субстратов (см. ранее, § 2.1). Значения полных влагоемкостей в торфе были близкими к 180%, в черноземе превышали 40%, а в песке – 20%. Капиллярные (КВ) и наименьшие (НВ) влагоемкости практически не отличались друг от друга в минеральных образцах и составили 1.5-2% в песке и 38-40% в черноземе. Для торфа НВ (95%) была значительно ниже КВ (125%). Значения констант ВЗ закономерно возрастали по мере увеличения дисперсности и содержания органического вещества в образцах от ≤1% в песке до 11-12% в черноземе и 85% в торфяной почве. Полученный спектр величин находится в хорошем соответствии с известными в литературе количественными оценками данных показателей для исследуемых классов почвенно-физических объектов [Смагин, 2003, Шеин, 2005].

Полученные данные ОГХ были аппроксимированы наиболее часто используемой в современных зарубежных моделях энергомассопереноса функцией ван-Генухтена (2.2). Аппроксимация выявила хорошее соответствие реальных данных ОГХ, полученных новым методом. Для всех исследуемых образцов были достигнуты максимально-возможные оценки величин достоверности аппроксимации R^2=0.99, при небольших стандартных ошибках аппроксимации s=0,008-0,015 и статистически достоверных параметрах модели. Визуальный анализ также подтверждает полную сходимость расчетных и экспериментальных данных, свидетельствуя с одной стороны об адекватности аппроксимационной функции ван-Генухтена, а с другой – о потенциальной возможности использования нового метода для информационно-экспериментального обеспечения современных моделей транспорта влаги и растворенных веществ в почвах и пористых средах. Сопоставление результатов, полученных новым методом, с наиболее близкими по физическому смыслу

Таблица 2.1. Варьирование результатов определения ОГХ почв различными методами:

Дерново-подзолистая окультуренная супесчаная почва					
Центрифугирование (n = 8)			Тензиометр, полевой метод (n=4)		
|P|	W%	σ^2	|P|	W%	σ^2
11,4	37,34	0,277	50	40,52	6,62
80,4	23,90	0,291	100	37,60	8,05
282	16,43	0,173	200	27,31	6,75
906	13,69	0,038	300	20,36	6,49
1835	12,21	0,029	500	14,82	4,18
2870	10,79	0,043	800	13,14	3,28
6456	9,61	0,186			

Кварцевый песок								
Центрифугирование (n= 4)			Капилляриметрия (n= 4-6)			Тензиометрия (n= 4-6)		
|P|	W%	σ^2	|P|,	W%	σ^2	|P|	W%	σ^2
6,5	25,72	1,022	10,7	25,30	4,735	50	21,36	6,220
12,5	12,89	0,107	17,0	22,40	1,585	100	5,88	9,101
100	7,70	0,428	32,0	18,70	2,843	200	4,42	1,605
196	5,55	0,366	129	7,10	1,587	400	3,90	1,877
780	4,56	0,168	324	5,17	2,202	500	3,48	0,387
1630	4,00	0,087	501	3,67	0,572	800	3,03	0,468
3631	3,21	0,025						
6456	1,52	0,370						

|P|, – модуль капиллярно-сорбционного давления, см.водн.ст., W% – средняя влажность, σ^2 – дисперсия данных процентной влажности.

данными методов равновесного центрифугирования [Смагин и др.. 98] и высоких колонн [Роде, 52, Глобус, 87], представленных на рисунке 2.9 в виде крестообразных символов, также выявило удовлетворительное соответствие. Различия в областях высокой и низкой влажности для тонкодисперсных образцов (торф, чернозем) скорее всего связаны с эффектом набухания и его неодинаковым

проявлением в точечных и распределенных плочвенных объектах.

Метод равновесного центрифугирования и его новая модификация (колоночно-центрифужный метод) выгодно отличаются от классических способов оценки ОГХ не только диапазоном определяемых величин и экспрессностью, но и более высокой точностью и воспроизводимостью результатов. О дисперсии данных, получаемых методом центрифугирования, в сравнении с капилляриметрией и тензиометрией дает представление таблица 2.1. Как видно преимущество методики состоит существенно меньшей дисперсии оцениваемых величин. Традиционно используемые методы характеризуются варьированием, фактически на порядок превышающим по дисперсии равновесной влажности метод центрифугирования.

Синхронное определение второй после ОГХ по значимости для моделирования энергомассопереноса в почвах функции влагопроводности в широком диапазоне варьирования переменных влажности (давления) с использованием модели (2.24-2.30) также является важным достижением метода.. На рис. 2.10. приведены экспериментальные данные кинетики дренирования образцов супесчаной дерново-подзолистой почвы и кварцевого песка, а также их аппроксимация моделью (2.26). Хорошее соответствие реальных и расчетных величин, разница между которыми существенно ниже стандартного отклонения, подтверждает адекватность модели. Для образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы (среднее из 4 повторностей) имеем значения параметров полинома (2.26): a=0,0557, b=0,5498, c=12,117 (рис. 2.10). По ним определяем величины начальной влажности W_0 =c=12,12%, k=2,733a/b= 0,28 $час^{-1}$, Wp=c–a/0,3536k^2 =10,1%. Используя величину k=0,28 $час^{-1}$ = 6,65 $сут^{-1}$, находим по уравнению (2.30) ненасыщенную гидравлическую проводимость. При этом учитываем давление почвенной влаги на предыдущем этапе центрифугирования (3200 об/мин, P_0=183,5кПа==1835 см.вод ст.), на данном этапе (4000 об/мин, P=287 кПа =2870 см.вод ст), среднюю плотность образца ρ_b=1,32 $г/см^3$ и его высоту h = 2 см. Тогда, согласно (2.30) получаем: $К_ц$=6,65(12,12-10,34)$2^2$1,3/{100(2870-1835)1}=$6\cdot10^{-4}$ см/сут.

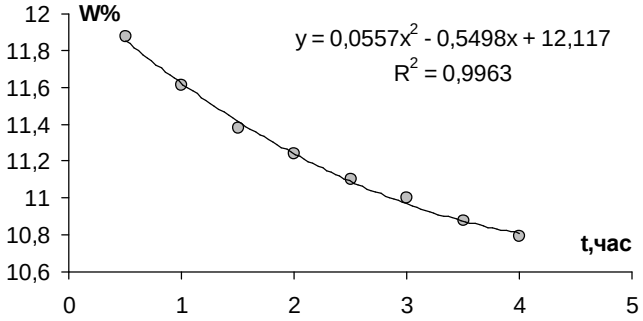


Рис. 2.10. Кинетика удаления влаги в образце дерново-подзолистой супесчаной почвы и ее аппроксимация моделью (2.26).

Резюмируя, сформулируем основные положения, позволяющие рекомендовать центрифугирования в качестве перспективного метода исследования гидрофизических функций почв при их конструировании с использованием современных моделей энергомассопереноса:

- определение ОГХ производится в широком диапазоне варьирования, достигающем размаха по влажности от ПВ до МГ. Метод отличается хорошей воспроизводимостью и точностью результатов. Допускается одновременное исследование от восьми до 32 образцов (центрифуга ЦЛС-3), что позволяет беспрепятственно увеличивать число повторностей и проводить репрезентативный сравнительный анализ ОГХ различных почв в идентичных условиях;
- Модификация в виде колоночно-центрифужного метода анализа распределенных образцов позволяет на базе центрифуг со средней скоростью (до 5000-6000 об/мин) получать практические непрерывные кривые ОГХ во всем естественном диапазоне варьирования параметров влажности от ПВ до МГ (модуля давления влаги от 0 до 2700-2800 кПа). Для охвата подобного диапазона обычным методом равновесного центрифугирования с точечными индивидуальными образцами следует использовать высокоскоростные современные центрифуги с максимальной скоростью порядка 15000-18000 (типа Hettich 320, Германия) и радиусом ротора порядка 10см;
- отсутствие необходимости использования специальных

мембран при отделении воды от почвы значительно расширяет диапазон измерений и способствует получению объективных результатов при анализе почв легкого гранулометрического состава. Помимо этого возможно определение ОГХ почв ненарушенного сложения при естественных влажностях и составе порового раствора;

- использование предложенной модели кинетики центрифугирования позволяет осуществить расчет равновесной влажности и функции влагопроводности почвы по данным о скорости дренирования образца и существенно сократить время эксперимента;
- метод дает возможность определять не только капиллярно-сорбционное (матричное) давление, но и другие составляющие полного потенциала влаги в почве (осмотическое давление раствора, давление нагрузки), а также гистерезис ОГХ;
- дополнительно, образцы на разных стадиях центрифугирования могут быть использованы для определения эмиссии (поглощения) газов при данном уровне влажности, служащей интегральной оценкой их биологической активности, а также температуропроводности, воздухопроводности и эффективных коэффициентов диффузии газов и паров [Смагин, 2005, Смагин, Садовникова и др., 2006];
- метод чрезвычайно прост в применении, не требует дополнительного оборудования и с помощью подручных средств может быть легко реализован на базе обычной лабораторной центрифуги.

Высокая точность и воспроизводимость результатов позволяют рекомендовать метод для сравнительной оценки эколого-физического состояния почв, а также и его изменений под действием природных и синтетических биополимеров в процессе конструирования.

ГЛАВА 3. Методы мониторинга почвенных режимов и экологического контроля при тестировании технологий почвенного конструирования.

Базовая характеристика физических, физико-химических, агрохимических и иных свойств исходных почвогрунтов, почвенных конструкций и использующихся в них материалов осуществлялась по общепринятым и авторским методикам, анализу которых посвящен заключительный раздел главы 2. Помимо характеристики базовых свойств на этапе тестирования предлагаемых технологий в полевых условиях исследований требовались мониторинг почвенных режимов и экологический контроль параметров функционирования почвенных конструкций, и данная глава монографии посвящена описанию использующихся при этом методик и приборного обеспечения.

3.1. Методика автоматизированного мониторинга температурного режима и динамики относительной влажности с помощью программируемых датчиков.

Мониторинг гидротермических параметров осуществлялся полностью автоматически с использованием программируемых мини-сенсоров температуры и относительной влажности DS 1921, DS 1923 фирмы Dallas Semiconductor (США) [Смагин, 2005, Смагин и др., 2006, 2008].

Это новейшие электронно-технические средства технологий так называемого скрытого экологического мониторинга, отличающиеся высокой эффективностью и экономичностью в получении информации. Датчики выполнены в виде цилиндрической таблетки (около 1,5 см в диаметре и 0,6 см высотой) из прочной нержавеющей стали, устойчивой к возможным механическим и химическим воздействиям окружающей среды. Перечень и краткая характеристика наиболее приемлемых для экологического мониторинга разновидностей таких датчиков содержатся в таблице 3.1. Как видно, с их помощью возможно проведение

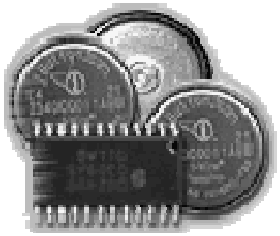


Таблица 3.1. Характеристика программируемых электронных датчиков «термохрон» и «гигрохрон» для экомониторинга.

Кодировка датчика	Диапазон температур °С	Точность, °С	Разрешающая способность, °С	Количество запоминаемых значений	Минимальная периодичность считывания
DS1921G	–40 - +85	1	0,5	2048	1мин
DS1921Z-F5	–5 - +26	1	0,125	2048	1мин
DS1922L	–40 -+85	0,5 (ПК)	0,5 или 0,0625	8192 или 4096	1сек
DS1922T	0 - +125	0,5 (ПК)	0,5 или 0,0625	8192 или 4096	1сек
DS1923*	–20 - +85	0,5 (ПК)	0,5 или 0,0625	8192 или 4096	1сек
(ПК) – программная коррекция *Измеряет так же влажность от 0 до 100% с разрешением 0,6 либо 0,04% и погрешностью не более чем ±3%, нормируемая вели чина температурной погрешности не более ±1°С. Стоимость датчиков – от 600 руб. (2007 г)					

мониторинга температуры и относительной влажности воздуха объектов окружающей среды с высокой точностью и оперативностью при небольшой стоимости оборудования. При этом в отличие от традиционных технологий контроля, требующих постоянного или периодического присутствия на опытных площадках исследователя, данная разработка, повторяем, позволяет осуществлять мониторинг полностью автоматически без каких либо коммуникаций со стационарной базой.

Датчики программируются посредством поставляемой разработчиком компьютерной программы «iButton Viewer» на определенный интервал (частоту) измерений для заданного периода мониторинга и помещаются в исследуемую среду. По прошествии этого периода их необходимо извлечь, присоединить через COM- или USB-порт к компьютеру и считать накопленную информацию за весь срок наблюдений. При частоте отбора показаний через каждые 4 часа (6 измерений в сутки) емкости памяти обычных серийных

датчиков хватает на год непрерывного мониторинга, а для новых разновидностей (DS1922, DS1923) этот срок вдвое выше. Минимальный интервал отбора проб варьирует от 1 сек до 1 мин, в зависимости от разновидности датчика. Общий энергетический ресурс датчиков рассчитан на 10 летний срок непрерывной эксплуатации.

Компьютерная программа «iButton Viewer» содержит две основные опции – исходного программирования датчиков «Wizard» и считывания результатов «Mission Results». Она активизируется автоматически при подключении датчиков через серийный порт к компьютеру. В подпрограмме «Wizard» предусмотрен следующий порядок действий: «Real Time Clock set» – установить время (по компьютеру на котором программируется в данный момент датчик), «Time Alarm» – заданное время отклика датчика на условный сигнал из сети, если он в нее встроен (позиция в наших исследованиях оказалась не востребованной, хотя возможно ее использование при применении датчиков для пуска каких либо устройств (полив, вентиляция) по критическим параметрам температуры и влажности), «Mission Start Delay» – время задержки старта (позволяет осуществить пуск датчика не сразу после программирования, а в удобное время, а также – синхронный пуск серии независимых датчиков, если на них установлено одно и то же время старта), «Sample Rate» – частота отбора показаний (варьируется в зависимости от конкретной задачи, минимальный интервал составляет 1сек (мин) для разных типов датчиков (табл.3.1)), «Temperature Alarms» – фиксирование критических параметров (позволяет по выбору исследователя определить значения критических (высоких, низких) величин и записать дополнительно информацию о их появлении в контролируемой среде), «Roll Over» – запись «поверх» (позволяет осуществлять запись новых значений со стиранием предшествующих, если емкость памяти переполнена), «Finish» – конец операции программирования датчика.

Для считывания информации с датчика используется опция «Mission results» с тремя рабочими окнами – «Log», «Histogram», «Temperature Alarms» в которых, соответственно, записывается информация о температуре в данный момент времени в виде непрерывной последовательности и

Таблица 3.2. Нормативы температурного режима почв и грунтов в связи с проблемой озеленения территорий г. Москвы (по [Смагин и др., 2006, 2008])

Показатель, единицы измерения:	**Градации:**	**Комментарии (влияние на плодородие почв, окружающую среду, растительность):**
Температура почвы (для верхнего корнеобитаемого слоя), °С	< – 2 весьма низкая температура	Почва промерзлая, биологическая активность подавлена, возможна гибель корневых систем и почвенных организмов
	–2 - 0- низкая	Почва промерзлая, или содержит незамерзшую влагу с высоким осмотическим давлением, слабая биологическая активность микрофлоры, анабиоз растений
	0-5 -холодная	Оттепель, оттаивание почвы, прорастание семян и луковиц (злаки, бобовые, зонтичные, луковичные..), активизация микрофлоры
	5-10 - умеренно холодная	Прогрев почвы, прорастание теплолюбивых культур, активизация почвенной фауны.
	10-15 - умеренно теплая	Достаточная теплообеспеченность почвы, умеренная биологическая активность и рост растительных культур.
	15-20 - теплая	Повышенная теплообеспеченность; активизация испарения и иссушения почвы, нормальная биологическая активность и рост при достатке влаги.
	>20 - высокая температура	Весьма высокие количества тепла, возможна засуха и угнетение биологической активности, транспирации и фотосинтеза.

гистограммы распределения по температурным классам, а также даты и длительность событий с экстремальными температурами.

В «Log» и «Histogram» возможно представление данных не только в табличном, но и в графическом изображении, для чего необходимо воспользоваться функцией «Quick Graf». Для сохранения результатов в табличном виде в форме текстового файла надо воспользоваться опцией «Export Results». После этого файл легко открыть в среде «Microsoft Excel» и

продолжить там необходимую обработку результатов.

С целью оценки влияния температурного режима почв на состояние городской растительности можно воспользоваться следующей системой градаций, разработанных нами для условий г. Москвы на основании многолетних наблюдений этим методом (табл. 3.2). Статистическая обработка получаемых многочисленных данных позволяет выявить средние и экстремальные (максимумы, минимумы) значения температур и сравнивать различные объекты по температурному режиму. Для общей интегральной оценки удобно использовать метод частотных распределений мониторинговых показателей, наглядно демонстрирующий вероятность проявления тех или иных значений за исследуемый период на соответствующей территории [Смагин и др., 2006]. При этом общая выборка данных ранжируется по характерным классам (градациям из табл. 3.2), и для каждого класса рассчитывается вероятность попадания в него значения исследуемого показателя (температуры).

Отметим, что система градаций температурного режима московских почв (табл. 3.2) предложена нами именно для метода точечного автоматизированного мониторинга температуры на базе программируемых датчиков. Дело в том, что обычные средства измерения температуры почвы в виде контактных термометров, на основе которых выполнялись классические исследования температурных режимов почв, обладают одним существенным недостатком. Их корпус при измерении температуры частично погружен в почву на заданную глубину, а частично выведен на поверхность (шкала градусников) для возможности визуального наблюдения. Несмотря на меры по термоизоляции одной части корпуса от другой при экстремально высоких или низких температурах теплообмен все же происходит. Поэтому в холодное время года такие термометры занижают температуру почвы, а в жаркое – наоборот завышают. Предложенная выше техника измерений лишена подобных недостатков, поскольку датчики зарываются на необходимую глубину почвы без какого либо последующего контакта с поверхностью и позволяют измерять и запоминать температуру непосредственно в данной точке почвенного профиля.

Более дорогие и функциональные датчики DS1923 «гигрохрон» наряду с температурой позволяют измерять еще один важный климатический показатель – относительную влажность воздуха (RH%). Техника программирования этих датчиков мало чем отличается от таковой для предыдущей серии DS1921, однако при этом требуется дополнительное программное обеспечение в виде компьютерной среды JAWA. При считывании результатов здесь возможно прямое копирование данных с последующим переносом в электронные таблицы EXCEL или иные приложения Microsoft Office.

Показатель $RH=C/C_0$ численно равен отношению концентрации водяного пара в атмосфере (C) к максимально возможному значению этой величины при данной температуре и давлении или так называемой концентрации насыщенных водяных паров (C_0). Он важен как для определения текущих погодных условий, так и для оценки потенциальной интенсивности испарения (транспирации) влаги почвогрунтами и растительностью. Низкие значения относительной влажности воздуха в дневные часы (менее 30-40%) указывают на засуху и отсутствие атмосферных осадков. Напротив, высокие значения (80% и более), чаще всего свидетельствуют о выпадении осадков или конденсации влаги. Суточный ход этого показателя в летнее время может быть весьма большим и составлять по амплитуде 60% и более с минимальными значениями в дневные часы и максимальными в ночные. Это связано с зависимостью концентрации (давления) насыщающего пара от температуры. С понижением температуры значение C_0 падает и при том же количестве водяного пара, что и днем может достигаться точка росы (RH=100%) или по крайней мере состояние близкое к насыщению (RH>80%). Испарение и эвапотранспирация во многом определяются дефицитом относительной влажности воздуха и если показатель RH стремиться к 100% (состояние насыщенности) эти процессы резко замедляются.

В отличие от атмосферы, показатель RH для почвенного воздуха в гумидных климатических условиях остается близок к 100% даже при сильном иссушении почвы до состояния влаги завядания растений или еще более низкой влажности – максимальной гигроскопичности (МГ). Дело в том, при МГ влага в почве находится в равновесии с парами воды с

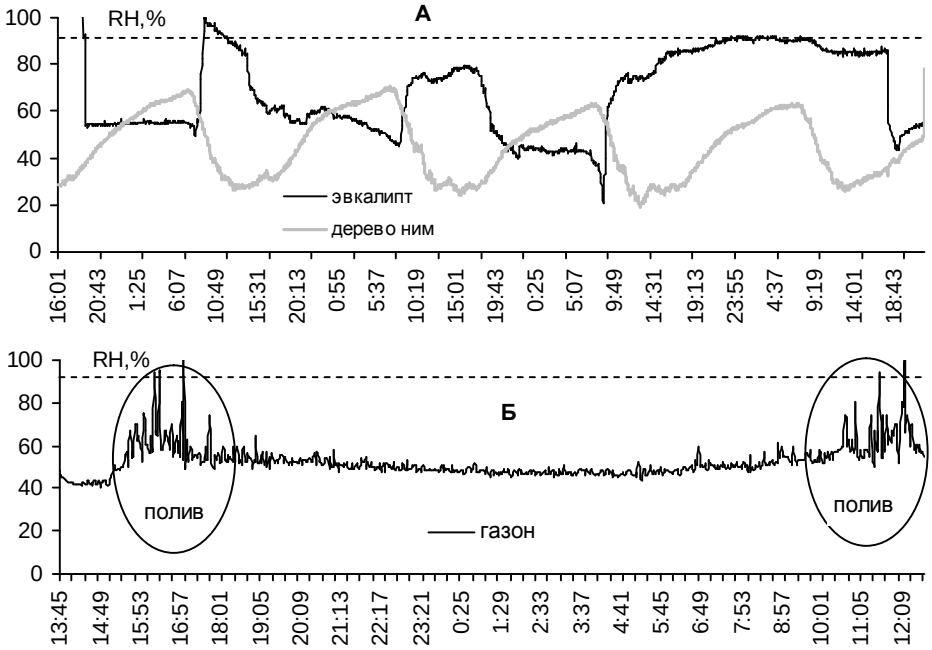


Рис. 3.1. Фрагменты автоматизированного скрытого мониторинга состояния поверхностного слоя почвы при орошении с помощью DS1923 (Бахрейн, 2005). А – королевская резиденция «Сахир», древесные посадки; Б – дворцовый комплекс «Рауди-палас», газоны.

относительной концентрацией (влажностью) RH=98%. То есть на весь спектр состояний влажности почвы от МГ до ПВ (полной водовместимости) приходится очень узкий диапазон 98≤RH≤100%. Точно и репрезентативно измерять относительную влажность почвенного воздуха в столь узком диапазоне на верхней границе применимости датчиков практически невозможно, отсюда по данным о RH нельзя оценивать содержание почвенной влаги, по крайней мере капиллярной и гравитационной, то есть той, которая нужна для водного питания растений.

Вместе с тем в аридных климатических условиях или при летних засухах в мегаполисе показатель RH может быть полезен для скрытой регистрации поступления влаги на

поверхность почвы в виде осадков или поливов. На рисунке 3.1 приведены результаты подобных измерений, выполненных нами на особо ответственных, закрытых для посещения королевских объектах Бахрейна. На верхней иллюстрации (А) сравнивается динамика увлажнения приствольных кругов двух типов деревьев – эвкалипта и священного дерева «ним» (Azadirahta indica), посаженных по технологии AG с использованием российского торфосапропелевого почвомодификатора. Претензии к российской стороне по поводу угнетения роста дерева «ним» удалось снять после анализа данных скрытого мониторинга. Как видно это дерево просто недополучало поливную воду, и уровень относительной влажности на поверхности не поднимался выше 70%, тогда как у соседнего эвкалипта периодические поливы доводили ее до 100%. При совместном осмотре поливной системы оказалось, что насадка, подающая воду, в приствольный круг угнетенного дерева забилась карбонатной пылью и практически не действовала, лишь слегка смачивая поверхность приствольного круга. Поскольку прямые наблюдения за ходом ирригации на закрытом объекте были бы невозможны, мониторинг с помощью DS1923 оказался в этом случае наиболее простым и действенным средством разрешения проблемы.

В нижней части рисунка (Б) приведены данные аналогичного мониторинга за состоянием увлажнения (полива) газона в дворцовом комплексе королевы-матери «Рауди-палас». Явно видны моменты полива (дождевания) газона в дневные часы на фоне длительной паузы с 18^{00} вечера до 10^{00} следующего утра.

В ходе реализации проекта по почвенному конструированию в г. Москве (Госконтракт № 8/3-66н-10) мониторинг температуры и относительной влажности воздуха в приземном слое атмосферы и в почве с помощью датчиков DS1921 и DS1923 производился на основном объекте в ЗАО (Крылатское). Кроме того, эта методика была использована и в ряде дополнительных экспериментов, включая почвенные конструкции в УОПЭЦ МГУ «Чашниково». Результаты приводятся в следующих главах монографии.

3.2. Методика мониторинга водно-воздушного режима почв и конструктоземов с использованием диэлькометрии и весового контроля.

Водно-воздушный режим является наиболее значимым в определении функционирования городских почв и в частности в поддержании роста зеленых насаждений. Недостаток влаги в засушливые сезоны или воздуха в периоды повышенного увлажения (затопления) почв приводит к гибели растительности не зависимо от уровня загрязнения или обеспеченности почв элементами минерального питания и органикой. Для количественной характеристики этого режима удобно использовать показатель степени насыщенности почвы влагой (W/W_s), представляющий собою долю пор, занятую влагой от общей пористости (водовместимости) или так называемой влажности насыщения (W_s) [Смагин и др., 2006]. Показатель безразмерен и варьирует от 0 до 1. Он может рассчитываться как по соотношению весовых влажностей (в случае однородных почвенных слоев), так и по соотношению ресурсных характеристик в виде запасов влаги в почвенном слое (горизонте) данной мощности к максимально возможным при заполнении всех пор почвенного тела влагой.

Для экологического нормирования данного мониторингового показателя нами были разработаны соответствующие градации, дифференцированные в зависимости от дисперсности гранулометрического состава) и, соответственно водоудерживающей способности различных почв и почвенных материалов (табл. 3.3). Выделение градаций показателя W/Ws в зависимости от дисперсности почв и грунтов основано на фундаментальной теории физического состояния почв и многочисленных экспериментах по термодинамической оценке их водоудерживающей способности [Смагин, 2003, Смагин и др., 2006]. Показатель учитывает специфику водно-воздушного режима почвы, в процессе которого могут возникать негативные для растительности и обработки почвы состояния избытка влаги (переувлажнения) или ее недостатка (иссушения). Как видно из таблицы, недостаток воздуха и,

Таблица 3.3. Нормативы водно-воздушного режима почв и грунтов в связи с проблемой озеленения городских территорий (по [Смагин и др., 2006])

Показатель, обозначение, единицы измерения, метод определения:	**Градации:**				**Комментарии (влияние на плодородие почв, окружающую среду, растительность):**
Степень насыщенности почвы влагой, W/Ws	Пески:	Супеси, торфа:	Легкие и средние суглинки:	Тяжелые суглинки и глины:	Различия в градациях в зависимости от вида почв и грунтов
	>0,85 – 0,9	>0,85 – 0,9	>0,85 – 0,9	>0,85 – 0,9	Высокие непродуктивные потери влаги (сток, испарение), угнетение роста из-за переувлажнения
	0,2 – 0,85	0,4 – 0,85	0,5 – 0,85	0,6 – 0,85	Оптимум для растений, но остаются высокие непродуктивные потери влаги и часто неблагоприятны технологические свойства.
	0,05 – 0,3	0,15 – 0,4	0,3 – 0,5	0,4 – 0,6	Доступная для растений влага при невысоких непродуктивных потерях
	<0,05	<0,1 – 0,15	<0,2 – 0,3	<0,3 – 0,4	Недоступная влага, гибель растений

(соответственно, анаэробиозис практически во всех почвах возникает при заполненности пор влагой на 85-90%, тогда как недостаток влаги четко дифференцирован, в зависимости от дисперсности и в тонкодисперсных тяжелых почвах даже значительные запасы влаги в 30-40% от максимального влагосодержания могут быть недоступны растениям и их

снижение до указанных критических величин будет вызывать гибель зеленых насаждений.

Обратимся к возможным инструментальным методам мониторинга этого показателя. Несмотря на уникальные технические характеристики, датчики DS1923, к сожалению, нельзя использовать для прямого контроля полевой влажности почв и грунтов в обычных гумидных условиях и они могут функционировать лишь в условиях засушливого климата при влажности почвы ниже максимальной гигроскопии (см. предыдущий раздел). Стандартный термостатно-весовой метод измерения влажности [Вадюнина, Корчагина, 73] весьма трудоемок и малоэффективен, поскольку он требует обязательной экскавации образцов и их сушки до постоянной массы в лабораторных условиях.

Существует группа косвенных инструментальных методов, основанных на измерении того или иного свойства почвы с которым функционально или коррелятивно связана ее влажность. Наибольшее распространение, особенно в современной зарубежной практике получили диэлькометрические методы или их модификации (например, метод TDR – time dimension reflectivity), связанные с оценкой диэлькометрической проницаемости почв для разного диапазона частот электромагнитных импульсов. Поскольку диэлькометрическая проницаемость у воды существенно выше, чем у воздуха, общее (измеряемое) значение для почвенного слоя будет во многом определяться объемным содержанием влаги в почве, хотя связь эта для всего диапазона содержания влаги нелинейна и различается в зависимости от структуры и дисперсности почвогрунтов. Ряд зарубежный фирм в Европе и США (Eijkelkamp, Decagon), имеющие представительства в Москве, специализируются на производстве подобных датчиков влажности, причем многие из них комплектуются даталоггерами и могут быть включены в систему сбора и радиотрансляции данных, что позволяет решать проблему автоматизированного мониторинга влажности почвы. Недостатком этих разработок является высокая стоимость, как индивидуальных датчиков, так и обслуживающих их компьютерных средств сбора, хранения и передачи информации, а также отсутствие принятых стандартов и

гостированных методик для осуществления подобных измерений в нашей стране. Кроме того, косвенные методы всегда чреваты неадекватностью данных и требуют жесткого постоянного контроля за настройкой датчиков.

В наших исследованиях предпринята попытка решения части означенных выше проблем мониторинга почвенной влажности [Смагин и др., 2006, 2008]. В частности, в качестве диэлькометрических датчиков были опробованы существенно менее дорогие аналоги для изменения влажности древесины и строительных материалов – индуктивные влагомеры SH-0453 (Россия) и MS-98 (КНР). Их стоимость на отечественном рынке варьирует от 1000 до 2500 руб, что практически на порядок ниже американских и западноевропейских аналогов. Приборы с успехом можно применять для оценки объемной влажности почв и грунтов в широком диапазоне содержания влаги от гигроскопии до состояния насыщения с точностью порядка 1-2%, при условии предварительной калибровки по стандартному термовесовому методу. Они чрезвычайно просты в применении, имеют небольшие габариты и работают от сменных аккумуляторов (батареек). Для измерения влажности необходимо лишь прислонить прибор к поверхности почвы (SH-0453) или внедрить в нее заостренные электроды (вилку) (MS-98). При этом на электронном табло высвечивается значение влажности. Для калибровки приборов служат переменные резисторы в виде колесика на боковой панели, регулирующие сдвиг нуля и коэффициент усиления сигнала. На фото 6 (см. Приложение) показан вариант измерения влажности портативным диэлькометром MS-98 (КНР) через перфорацию в стенке пластиковой трубы с почвой (съемный монолит). Помимо влажности, данный прибор определяет температуру, отражающуюся на нижнем электронном табло.

Еще более простой и надежный способ мониторинга водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя почв базируется на гравиметрии в полевых условиях. С этой целью можно использовать монолиты (фрагменты) почв различного размера и портативные средства их взвешивания. Из последних по критерию цена/качество хорошо зарекомендовали себя китайские приборы в виде портативного электронного безмена ТН 312 (предельная нагрузка 10 кг с точностью взвешивания 10

г) и портативные технические весы THP-E (200г с точностью 0,1 г), стоимость которых не превышает 1000 руб (фото 6). Реализация на их основе гравиметрического метода мониторинга влажности, который, по сути, является полным аналогом стандартного для нашей страны гостированного термостатно-весового метода определения влажности, осуществлялась в следующих вариантах. Первоначально мы использовали достаточно крупные монолиты корнеобитаемого слоя с газонной дерниной площадью 50х50см^2 [Смагин и др., 2006, 2008]. Монолит помещался на тонкую перфорированную пластину, в которой были вмонтированы держатели для крепления электронных весов (безмена) TH-312 (Tsinghua Co., Ltd, КНР). Периодически пластина с монолитом взвешивалась, для чего ее механически приподнимали от поверхности почвы. По данным об исходной влажности почвы в момент закладки эксперимента (W%) и массе корнеобитаемого слоя ($m_{вл}$) находилась масса абсолютно сухой почвы (m_s), согласно известной зависимости [Вадюнина, Корчагина, 73]: $m_s = 100m_{вл}/(100+W\%)$.

Данные по динамике веса пластины с почвой позволяли рассчитывать текущую влажность и запас влаги в корнеобитаемом слое. Для этого вычислялось количество воды в корнеобитаемом монолите по разности масс монолита и абсолютно сухой почвы в нем. После чего это количество нормировалось массой абсолютно сухой почвы (влажность) или площадью пластины (запас). С учетом параметров пластины и массы монолита, а также точности взвешивания, точность измерения динамики влажности составляла 1,5%. Максимальная за сезон влажность в весеннее время после схода снега принималась в качестве величины W_s (влажность насыщения) при вычислении критерия W/W_s. Взвешивание в зимнее время позволяло определить количественно запас влаги собственно в почве и запасы в снеговом покрове на элементарной площади.

Результаты гравиметрического мониторинга водно-воздушного режима почвы за двухлетний период под газонной растительностью на территории Московского зоопарка приведены на рисунке 1.3 (см. главу 1). Для исследуемого класса почв по гранулометрическому составу состояние переувлажнения соответствует $W/W_s > 0,9$, засухи почвы

$W/W_s < 0,3$ (табл.3.1). Мониторинг водно-воздушного режима корнеобитаемого слоя по степени насыщенности влагой (величина W/W_s) показал, что в течение вегетационного периода 2006 года большинство значений (66 %) лежит в пределах оптимума. В 10 % случаев нами был отмечен недостаток влаги, но не значительный, а в 24 % случаев наблюдалось переувлажнение. Данные за более сухой вегетационный период 2007 года следующие: 55 % значений лежат в пределах оптимума, в 38 % случаев наблюдался недостаток влаги и 7 % - в зоне переувлажнения (рис. 1.3). Сезонное уменьшение количества влаги до критических для растений пределов в летние периоды дефицита осадков (засухи), становится характерным явлением в современных условиях г. Москвы [Смагин и др., 2006]. Поэтому для газонов и цветников с неглубокой корневой системой, как уже говорилось в главе 1, необходима организация периодических поливов в такое время и запрещение скашивания фитомассы, во избежание необратимого увядания, а для особо ответственных объектов в центре города вообще целесообразно устанавливать стационарные ирригационные системы с поливом дождеванием (газоны) или капельно-струйным орошением (цветники, ценные древесные солитеры).

Отметим, что водно-воздушный режим почвы напрямую контролирует не только ее продуктивность (рост зеленых насаждений), но и другие экологические функции – биодеструкцию, эмиссию и поглощение газообразных веществ, (рис. 2.5). Недостаток почвенной влаги в засушливые периоды резко угнетает деятельность почвенных организмов, дыхание почвы и ее ремедиационную способность по отношению к атмосфере в виде поглощения токсичных газов, приводит к сильному пылению поверхности [Смагин, 2009].

Возвращаясь к методике оценки водно-воздушного режима почв с помощью гравиметрии в полевых условиях, рассмотрим еще один вариант, который был использован нами на объектах почвенного конструирования в г. Москве в ходе выполнения Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10. Поскольку размеры площадок с почвенными конструкциями в городе были небольшими, мы модифицировали рассмотренный выше метод, используя вместо пластины с монолитом корнеобитаемого слоя

мини-лизиметры в виде пластиковых стаканчиков, наполненных почвогрунтом (фото 6). В перфорированное дно стаканчика была вклеена гидрофильная ткань (геотекстиль), свободно пропускающая воду и обеспечивающая гидравлический контакт мини-лизиметра с нижележащим почвенным слоем. Для установки мини-лизиметра в полевых условиях вначале вырезалось отверстие под диаметр стаканчика, далее в него вставлялся первый стаканчик-ограничитель с обрезанным дном, фиксировавший стенки отверстия от осыпания, в который уже помещался сам мини-лизиметр с почвой (фото 6). Взвешивание мини-лизиметров производилось непосредственно в полевых условиях при помощи портативных электронных весов THP-E (KHP).

После завершения периода режимных наблюдений мини-лизиметры извлекались из почв и транспортировались в лабораторию. Там вначале их полностью насыщали влагой, помещая в стеклянный стакан и заливая в него воду вровень с поверхностью почвогрунта в мини-лизиметре. После взвешивания в насыщенном состоянии (m_s), мини-лизиметр помещался в сушильный шкаф и доводился до постоянной массы (m_{ac}) иссушением влаги при 105^{o}C по стандартной методике определения влажности почвы [Вадюнина, Корчагина, 73]. Зная массу самого лизиметрического стаканчика без почвы (m_0) и оцененные в лаборатории предельные состояния почвы – абсолютно сухое и максимально увлажненное, легко было рассчитать влажности почвы (W) и значения показателя водно-воздушного режима W/W_s за весь срок наблюдений. Влажность находилась по известной формуле [Вадюнина, Корчагина, 73] $W=100(m–m_{ac})/(m_{ac}–m_0)$, где m – измеряемая в полевых условиях взвешиванием переменная величина массы мини-лизиметра. Анализ полученной таким способом информации о водно-воздушном режиме контрольных почв и конструктоземов приводится в соответствующей главе монографии. В завершении отметим, что нельзя оценивать показатель W/W_s напрямую по соотношению масс лизиметра при данной влажности (W) и состоянии насыщения (W_s) даже при одинаковом весе сухой почвы и самой тары. Очевидно, что при этом ошибка будет тем значительнее, чем больше вес сухой

почвы в лизиметре (m_{ac}), поскольку соотношения W/W_s и данных по взвешиванию лизиметров будут выглядеть как:

$$\frac{W}{W_s} = \frac{m - m_{ac}}{m_s - m_{ac}}, \qquad (3.1)$$

где m, m_s – массы лизиметров с почвой при текущей влажности (W) в состоянии насыщения (W_s), m_{ac} – масса лизиметра с почвой, высушенной до абсолютно-сухого состояния.

3.3. Метод съемных монолитов-реперов для оценки динамики запасов влаги, водорастворимых загрязняющих веществ и закономерностей их профильного распределения.

Предшествующий способ мониторинга водно-воздушного режима почв характеризовал поверхностный слой. Вместе с тем для влагоаккумулятивных почвенных конструкций с экранами от загрязняющих водорастворимых веществ, очевидно, требуется анализ динамики профильного распределения влаги и растворенных веществ, а также их запасов в основной толще, где локализуются те или иные функциональные слои (горизонты) конструктоземов. Сама по себе эта задача весьма трудоемка и требует постоянного отбора проб с разных глубин с помощью бурения и их анализа в лабораторных условиях. Мы существенно упростили эту задачу, предложив технику съемных монолитов-реперов, позволяющую производить все необходимые измерения непосредственно в поле. Такая техника, на наш взгляд может найти широкое применение в целях экомониторинга поверхностного загрязнения городских почвенных объектов на постоянных площадках для выявления трендов аккумуляции вредных веществ, гарантируя отсутствие артефактов, связанных с пространственной неоднородностью свойств почв при отборе проб на загрязнение.

В качестве емкостей для монолитов используются обычные ПВХ-трубы фабричного изготовления, предназначенные для водопроводной и канализационной сети. Для экспериментов с почвенными конструкциями были приобретены стандартные отрезки труб оптимального размера – 50см высотой и 5 см диаметром в комплекте с теплоизоляцией в виде мягких цилиндрических кожухов из пористого полимерного материала, внутренний диаметр которых был

подогнан под размер самих ПВХ-труб. В свою очередь внешний диаметр теплоизоляционной трубы удачно совпал с размером насадки для бура фирмы Eijkelkamp, применяемой в наших исследованиях для производства скважин при отборе почвенных образцов.

В ПВХ-трубку засыпался почвогрунт или система слоев с почвомодификаторами, соответствующая таковым в той или иной почвенной конструкции в случает легкого гранулометрического состава. Для агрегированных тяжелых почв в ПВХ-емкость помещался образец ненарушенного сложения, для чего установленная на поверхность почвы вертикально трубка постепенно заглублялась внутрь почвы, обкапываясь с внешней поверхности саперной лопаткой. Во дно ПВХ-емкости вклеивалась гидрофильная водопроницаемая мембрана из геотекстиля, укрепленная на пластмассовом кольце, вплотную входящим внутрь трубки. Мембрана была закреплена на 1-2 см выше нижнего торца трубки, и в образовавшееся пространство вкладывался цилиндрический кусок поролона, обеспечивающий гидравлический контакт монолита с почвой на дне скважины.

По внешней стороне монолита в стенке ПВХ-емкости на расстояниях (5), 10, 20, 30, 40 см от верхней части почвы были проделаны 2мм отверстия для электродов детектора влажности MS-98 (КНР) и кондуктометра HI DIST WP (фирма HANNA Inst), позволяющих оценивать содержание влаги и электропроводность, в свою очередь зависящую от концентрации водорастворимых солей поллютантов (фото 7). Для установки монолита в почву вначале буром Eijkelkamp формировалась вертикальная скважина глубиной 50см. Потом в нее плотно вставлялся цилиндрический кожух-обсадка из фабричной теплоизоляции для ПВХ-труб. В полученное отверстие с фиксированными стенками можно было помещать сам съемный монолит в ПВХ-трубке, а также периодически вынимать его оттуда на момент измерений (фото 7). Мониторинговые измерения включали регулярное взвешивание монолита электронным безменом ТН 312, замеры послойного содержания влаги и электропроводности приборами MS-98 и HI DIST WP (фото 7). После каждой серии измерений отверстия

для электродов в корпусе съемного монолита заклеивались гидроизоляционной лентой-скотчем.

Помимо мониторинговых наблюдений, монолиты были использованы для проведения фильтрационного эксперимента и контроля динамики загрязняющих водорастворимых веществ в почвах и почвенных конструкциях. С этой целью к верхнему расширенному концу ПВХ-трубки монолита герметично присоединялась аналогичная пустая трубка, которая потом заполнялась 1 л водного раствора NaCl с добавкой уксуснокислого свинца для имитации загрязнения (засоления) городской почвы (фото 7). Сверху система плотно закрывалась фабричной пластмассовой заглушкой и оставлялась на время инфильтрации солевого раствора в монолит. Периодическое измерение уровня раствора в верхней трубе позволяло рассчитывать коэффициент влагопроводности при впитывании с переменным напором, согласно [Вадюнина, Корчагина, 73]. По окончании впитывания верхняя труба убиралась а на ее место переставлялась пластмассовая заглушка для изоляции поверхности монолита от осадков и поливных вод. Вес монолита сразу после эксперимента (насыщения водным раствором) позволял рассчитать максимально возможные запасы влаги, соответствующие полной влагоемкости. По прошествии 1-2 суток гравитационного оттока вес монолита характеризовал водоудерживающую способность (запасы влаги) в состоянии наименьшей влагоемкости. В дальнейшем крышка, герметизирующая поверхность монолита удалялась и динамика влажности, запасов влаги, электропроводности и иных режимных показателей предоставлялась своему естественному ходу в данных погодных условиях.

В отдельных экспериментах осуществлялась промывка монолита от загрязняющих веществ с подачей расчетного количества чистой воды на поверхность через ПВХ-трубку. Для ускорения вертикального переноса солей к поверхности при испарении влаги часть монолитов транспортировалась в лабораторию кафедры физики почв ф-та почвоведения МГУ и экспонировалась там под источником тепла и света в виде настольной лампы и струей воздуха их стационарной компрессорной установки (фото 7).

Таблица 3.4. Нормативы солевого режима почв и грунтов в связи с проблемой озеленения городских территорий (по [Смагин и др., 2006])

Показатель: Электропроводность порового раствора, Ec, дСм/м	
Градации:	**Комментарии (влияние на плодородие почв, окружающую среду, растительность):**
<2 незасоленные	Растения развиваются нормально
2-4 очень слабо засоленные	Наступает угнетение роста чувствительных к засолению видов (бобовые, зонтичные, луковичные, розы, плодовые деревья и кустарники, ягодные, лещина)
4-8 слабозасоленные	Гибель чувствительных видов, угнетение роста и снижение до 50% продуктивности большинства растений, неблагоприятные изменения физико-химических свойств почв.
8-16 среднезасоленные	Снижение до 50-70% продуктивности толерантных к засолению видов (тополь, осина, ольха, райграс, пырей, овсяница), гибель большинства растений, необратимые изменения структуры почвы
16-32 сильнозасоленные	Гибель практически всех растений, необратимая деградация почвы и разрушение ее структуры
> 32 очень сильно засоленные	Бесплодные и безжизненные грунты

Рассмотрим подробнее проблему мониторинга солевого состояния почв на базе портативных кондуктометров-солемеров. В связи с кардинальной для городских условий проблемой засоления почв и грунтов растворимыми веществами-электролитами, в наших работах предложено использовать интегральный физический показатель – электропроводность порового раствора [Смагин и др., 2006, 2008]. Его градации с необходимыми комментариями

приведены в табл. 3.4. Экспрессную оценку засоленности почв, качества и доступности влаги растениям по электропроводности ирригационных вод, почвенных растворов и паст удобно проводить на базе портативных кондуктометров HANNA Inst., отличающихся хорошей точностью, воспроизводимостью и надежностью измерений при относительно невысокой стоимости приборов. В частности, можно порекомендовать приборы марки HI DIST WP4 и HI 98130 Combo (стоимость порядка 3000-6000 руб.), измеряющие электропроводность (Ec) в диапазоне 0-20 дСм/м с разрешением 0,01 дСм/м, поскольку незасоленным почвам и водам соответствует электропроводность менее 2-4 дСм/м, а сильной степени засоления – 16-20 дСм/м (таблица 3.4). Приборы характеризуются небольшими размерами (160x40x26мм для HI 98130) и работают от 4 сменных часовых батареек по 1,5В. Более дорогой вариант Combo измеряет также температуру и pH растворов и суспензий (паст).

Техника измерений предельно проста и сводится к двум последовательным процедурам – помещению встроенных в корпус электродов в раствор (пасту) и снятию отсчета значений электропроводности (или других измеряемых параметров) с электронного дисплея прибора после нажатия кнопки энергопитания. Для получения результатов относительно насыщенного порового раствора (нормативные величины) достаточно измерить Ec почвенной суспензии в дистиллированной воде (обычно разведение 1:5) и поправить полученный результат на отношение $500/W_s$, где W_s – полная влагоемкость образца (см. предыдущий раздел). Синхронно определяется pH раствора. В наших исследованиях на съемных монолитах определение электропроводности проводилось прибором HI DIST WP4, снабженного специальной насадкой для удлинения электродов и возможности измерения величины Ec в почве монолита через отверстия в стенке ПВХ-трубы (фото 7). Вначале прибором MS-98 через эти отверстия определялась влажность, после чего в них из пульверизатора впрыскивалась дистиллированная вода для локального увлажнения места контакта почвы с мини-электродами насадки кондуктометра HI DIST WP. Такая операция, не меняя влажности монолита в целом, позволяла оценивать электропроводность в точке

измерений в состоянии близком к пасте (стандартная методика). Это особенно важно для тонкодисперсных почв, где в общей электропроводности почвы имеет значительный вклад поверхностная проводимость по твердой фазе. Результирующий показатель относительной концентрации загрязнителя-электролита (C/C_0), на основании которого осуществлялась оценка динамики профильного распределения и концентрирования водорастворимых поллютантов в монолите, рассчитывался как отношение текущего значения электропроводности в данной точке монолита к максимальному из всех встречавшихся за период наблюдений значений $C/C_0=Ec/Ec_{мах}$.

Иссушение почвы при физическом испарении воды значительно усугубляет действие электролитов и загрязняющих почву растворимых веществ, поскольку увеличивается их концентрация в растворе. На рис. 1.4 (см. главу 1) представлены зависимости удельных величин концентрации электролитов равновесных поровых растворов в зависимости от влажности, иллюстрирующие это положение. Попытки избавиться от электролитов раз и навсегда путем промывок почвы большими порциями воды редко бывают успешными, поскольку с капиллярным током влаги, растворимые соли неизменно возвращаются к поверхности почвы и опять концентрируются там после испарения воды. На рис. 1.6. первой главы приведены примеры экологической оценки засоления почв аридных и гумидных ландшафтов кондуктометрическим методом.

3.4. Методика контроля почвенного дыхания и газовой функции почвенных объектов с использованием портативных газоанализаторов.

Функционирование почв как живых, биокосных систем, по аналогии с организмами, удобно оценивать интегральным показателем почвенного дыхания. Несмотря на сложность этого процесса, сочетающего в себе наряду с биотическими составляющими (собственно поглощение кислорода–выделение CO_2 микроорганизмами и корнями растений) множественные абиотические физические и физико-химические механизмы (транспорт газов, адсорбция, растворение и т.д.) дыхание почв

повсеместно применяется для характеристики их функционирования. В наших предшествующих исследованиях была разработана модифицированная методика инкубации почв в закрытых флаконах для оценки их потенциальной биологической активности (дыхания) в стандартизированных условиях по эмиссии CO_2 (потреблению O_2) с поправкой на межфазные взаимодействия, а также градации данного показателя применительно к почвам г. Москвы [Смагин, 2005, Смагин и др., 2006, 2008]. Эта методика предназначалась для анализа образцов почв в лабораторных условиях.

Для сравнительной оценки функционирования почв и конструктоземов на одной и той же территории в одинаковых метеоусловиях, а также с целью характеристики газовой функции почв по отношению к атмосфере можно использовать методы полевых измерений дыхания, эмиссии и поглощения газообразных веществ поверхностью почвы. Наиболее распространенный вариант подобных измерений называется ***камеро-статическим методом***. Суть его заключается в установке на поверхность почвы камеры-изолятора с известными геометрическими характеристиками, в которой отслеживают динамику концентраций измеряемого газа, и по ней рассчитывают соответствующие потоки (выделение или поглощение газа поверхностью почвы). В данной работе предложена модификация метода, базирующаяся на использовании современных средств измерения концентраций газов и паров в виде портативных газоанализаторов. Эти газоанализаторы были вмонтированы в камеры, что позволило получать тренды накопления (поглощения) газообразных веществ в полевых условиях в ходе эксперимента. В результате удалось заменить трудоемкую и не всегда корректно выполняемую процедуру отбора газовых проб из камер, их консервацию с последующим анализом в лаборатории на непосредственный анализ, производимый целиком и полностью в поле на измерительной площадке. Высокая точность анализаторов (разрешительная способность на уровне 1ppm) позволила значительно сократить время анализа дыхания. В традиционном варианте он занимал 15-20 мин и более, за которые в камере успевал накапливаться выделяемый почвой газ в таких концентрациях, чтобы их можно было измерить в

лаборатории на хроматографе или ином стационарном приборе в 2-3 небольших пробах воздуха, последовательно отобранных из камеры. В нашем случае вмонтированный в камеру газоанализатор регистрировал непрерывный тренд динамики концентраций через каждые 10-15 секунд и уже по прошествии 1-2 минут было возможно оценить по нему интенсивность выделения или поглощения газообразного вещества почвой.

На фото 8 (см Приложение) приведены снимки разработанных в ходе реализации Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10 устройств для полевого измерения потоков газов на поверхности почв и почвенных конструкций. В левом верхнем углу приведена камера с газоанализатором AZ 7752 (t^oC+CO_2) (КНР), позволяющим измерять концентрацию диоксида углерода и температуру воздуха. Это оборудование применялось для оценки почвенного дыхания (эмиссии CO_2) в основном эксперименте по Госконтракту ПМ № 8/3-66н-10 на территории Серебряноборского опытного лесничества (ЗАО, Крылатское). Камера в виде параллелепипеда из оргстекла площадью 30х20 см и 10 см высотой устанавливалась на заранее выровненную и очищенную от вегетирующих органов растений площадку, а по нее подкладывался включенный прибор AZ 7752, осуществляющий измерения концентрации CO_2 . В течение 2-2,5 минут показания прибора фиксировались в журнале измерений через каждые 10 сек. Далее камера устанавливалась на новый участок и операция повторялась.

В камеральных условиях производилась обработка полученной информации и расчет почвенного дыхания. С этой целью данные набивались в электронные таблицы EXCEL и по ним строился график зависимости прироста концентрации CO_2 в камере от времени. Примеры графиков с аппроксимацией данных уравнением прямой приведены на рисунке 3.2. Как видно из примеров все тренды характеризовались четкой линейной зависимостью с коэффициентами детерминации R^2=0,98-0,99, что и предсказывается теорией эмиссионных потоков из почвы в начальные моменты времени, когда прирост отражает истинную, не лимитированную объемом камеры, интенсивность измеряемого процесса [Смагин, 2005]. Тангенс угла наклона прямой линии тренда (A [ppm/c]) или угловой коэффициент в уравнении линейной регрессии позволял

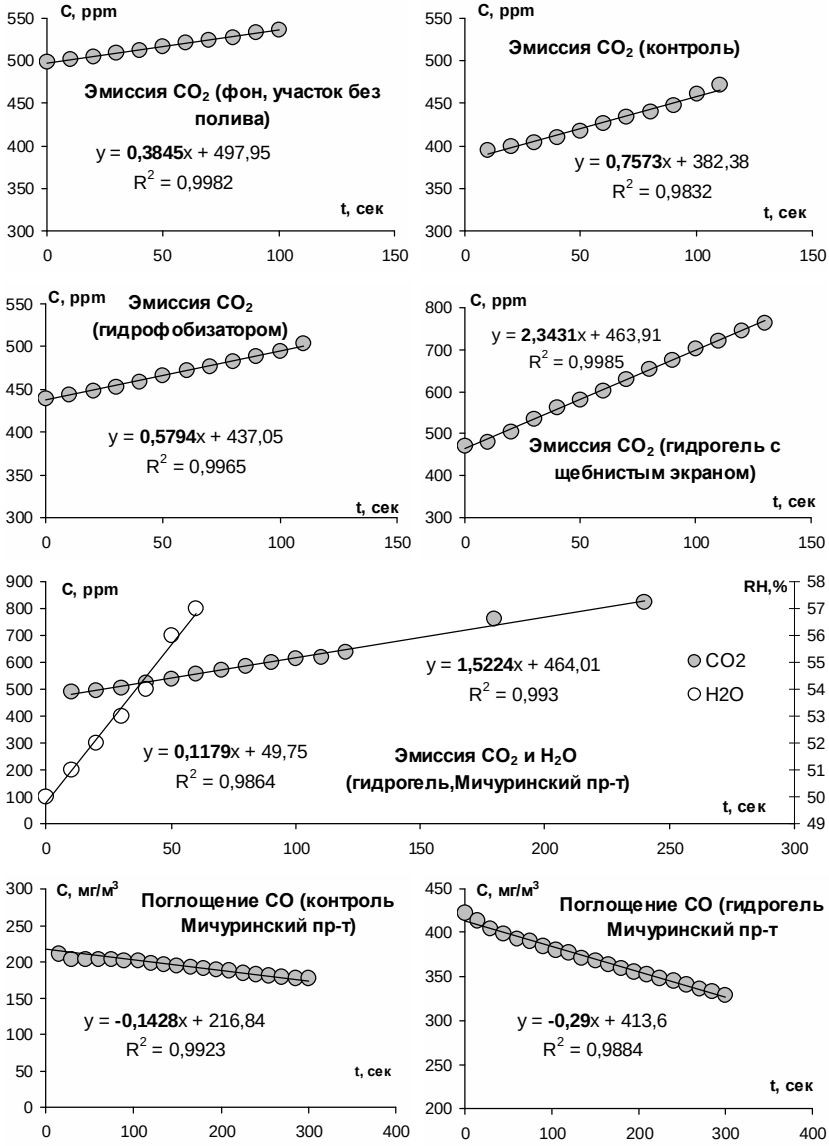


Рис.3.2. Примеры трендов динамики концентраций газообразных веществ при определении потоков модифицированным камеро-статическим методом на опытных площадках в г. Москве (Госконтракт ПМ № 8/3-66н-10).

рассчитать величину эмиссии CO_2 (почвенного дыхания) по следующей формуле [Смагин, 2005]:

$$Q_{CO_2} = \frac{A \cdot P \cdot M \cdot h}{R \cdot T} = \frac{19{,}3 \cdot A \cdot 10^3 \cdot h}{(273 + t^oC)}, \qquad (3.2)$$

где Q [мгCO_2/м^2/час] – искомая величина дыхания, P – атмосферное давление, M – молекулярная масса газа, h – высота камеры, R – универсальная газовая константа, T – абсолютная температура, t^{o}C температура в градусах Цельсия. Правая часть уравнения (3.2) представляет собою рабочую формулу, в которой учтены значения постоянных и физические размерности входящих величин. Подставляя в нее значения тангенса угла наклона A в ppm/c, высоту камеры h в см и температуру воздуха в момент проведения опыта t^{o}C в градусах, получаем искомую величину потока CO2 в мгCO_2/м^2/час.

В середине верхнего ряда и внизу на фото 8 показан внешний вид малой камеры 15x15x10см, в которую был вмонтирован более функциональный датчик AZ 7755 (t^{o}C+RH+CO_2), позволяющий помимо углекислого газа и температуры измерять относительную влажность (RH%) воздушной среды. Заметим, что газоанализаторы серии AZ 77, поставляемые на российский рынок из КНР, отличает портативность и высокая точность измерений при очень небольшой стоимости (порядка 6000 руб). Для примера аналогичные по функциональным возможностям приборы европейских и российских (ФИАН) производителей стоят в 7-10 раз дороже. Измеритель AZ 7755 предназначен для контроля качества воздуха в помещении, и он питается от электросети через прилагающийся к прибору адаптер. Для его адаптации к полевым измерениям был приобретен аккумулятор на 12 вольт с необходимыми соединительными элементами, что позволило использовать прибор в малой камере для определения потоков CO_2 и водяного пара с поверхности почв (фото 8).

Оценка эмиссии водяного пара осуществлялась также как и для CO_2 по линейным трендам прироста концентрации (относительной влажности) в камере (рис. 3.2). Для расчета потока использовалось следующее уравнение:

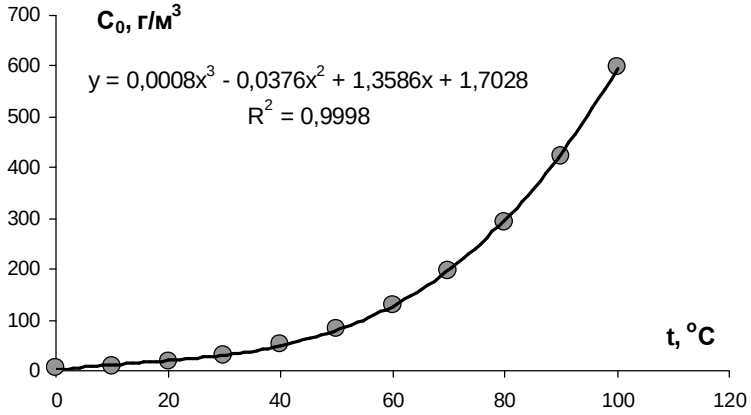


Рис. 3.3. Зависимость насыщающей концентрации паров воды от температуры.

$$Q_{H_2O} = \frac{A \cdot C_0 \cdot h}{100} = \frac{A \cdot (0{,}029 \cdot t^3 - 1{,}35 \cdot t^2 + 48{,}9 \cdot t) \cdot h}{100}, \quad (3.3)$$

где Q [гH_2O/м^2/час] – искомая величина C_0 – концентрация насыщающих водяных паров [г/м^3]. Последняя величина сильно зависит от температуры (рис. 3.3). Обработка табличных данных этой зависимости кубическим полиномом позволила получить уравнение, которое и было включено в правую часть формулы (3.3) после умножения его коэффициентов на константы размерностей времени (перевод секунд в часы). В результате, подставляя в правую часть (3.3) значения тангенса A в %RH/сек (см графики на рис. 3.2) и температуру t в градусах Цельсия, легко было рассчитать величину потока пара из почвы Q в гH_2O/м^2/час .

Помимо эмиссий углекислого газа и пара камерная техника позволила оценить важнейшую для антропогенных почвенных объектов экологическую функцию ремедиации атмосферы в виде поглощения угарного газа (CO). Эта функция стала особенно значимой в летний сезон 2010 года, когда подмосковные лесные и торфяные пожары привели к превышению в столичном мегаполисе в течение нескольких дней начала августа ПДК по содержанию угарного газа в 3-4 раза и более. Монооксид углерода (угарный газ) относится к

одним из наиболее токсичных техногенных загрязнителей атмосферы. Токсичность этого газа объясняется тем, что он обладает в 200 раз большим сродством к гемоглобину, чем кислород. Замена даже одной молекулы кислорода на монооксид углерода значительно усиливает связь остальных трех молекул кислорода с гемоглобином, в результате организм, вдыхая угарный газ даже в небольших количествах, рискует задохнуться от недостатка кислорода. По российским стандартам среднесуточные и разовые предельно допустимые концентрации CO в атмосфере составляют 5 и 3 мг/м^3. Среди природных процессов, приводящих к образованию CO отмечают лесные пожары, окисление метана, распад хлорофилла, эмиссию из глубинных слоев литосферы, океана, выделение наземной растительностью [Смагин и др., 2009]. Для городских условий приоритетным источником монооксида углерода является автотранспорт, и, несмотря на достаточно жесткое лимитирование выбросов этого газа при техосмотре автомобилей, по данным Мосэкомониторинга в г. Москва содержание CO вдоль автомагистралей может достигать 120 мг/м^3, то есть в десятки раз превышать установленные нормы ПДК.

Поглощение почвенным покровом, по-видимому, превышает все известные процессы очищения атмосферы от угарного газа, включая фотохимическое окисление и утилизацию растениями [Смагин, 2005]. Отсюда первостепенной задачей является оценка этого процесса на количественном уровне для различных типов городских почв, почвенных конструкций и материалов. Мы приступили к решению этой задачи, используя технику портативных газоанализаторов, начав с лабораторных экспериментов [Смагин и др., 2009]. В работе был задействован газоанализатор ПКГ-4 CO, отечественного производства (ООО «Практик НЦ», г. Зеленоград), впервые применяемый с этой целью в почвоведении. Прибор позволяет измерять объемное содержание монооксида углерода в диапазоне 0-350 мг/м^3 с шагом 1 мг/м^3 и относительной погрешностью не более 8%. В качестве чувствительного элемента для измерения концентрации монооксида углерода используется электрохимический сенсор. Техника измерения чрезвычайно

проста и сводится к отсчету концентрации CO с электронного табло анализатора, помещенного в загрязненную атмосферу. Для ускорения равновесия между сенсором и окружающим воздухом к датчику присоединялся 10мл шприц, осуществляющий механическую прокачку воздуха через прибор.

В настоящих исследованиях по Госконтракту ПМ № 8/3-66н-10 этот газоанализатор был вмонтирован в малую камеру, что позволило определять поглощение CO поверхностью почвы непосредственно в полевых условиях. Вид камеры с датчиком CO представлен на фото 8 (см Приложение). Для измерения потока в камере создавался повышенный уровень угарного газа (порядка 100-200 мг/м^3). Источником CO служила тлеющая фильтровальная бумага в стеклянном 2л резервуаре, откуда 50мл шприцом забиралась порция воздуха и помещалась в камеру. Замеры убыли концентрации производились через интервалы в 15-20сек, что позволяло получать линейные тренды, аналогичные таковым для эмиссии газов и паров (рис. 3.8). По тангенсу наклона трендов (A [мг/м^3/с]) легко было определить интенсивность поглощения CO поверхностью почвы (поток Q), используя простое уравнение:

$$Q_{CO}=36\cdot A\cdot h\,, \qquad (3.4)$$

где Q [мгCO/м^2/час] – искомая величина потока, h – высота камеры [см], 36=60·60/100 –коэффициент, учитывающий перевод единиц времени (секунды в час) и высоты камеры (см в м). Поскольку прибор сразу давал показания концентраций в мг/м^3, а не в ppm, здесь не надо было вводить переход от объемного содержания газа к массовой доле, как в случае CO_2 (более сложное уравнение 3.2).

Для почвенного дыхания (эмиссии CO_2 поверхностью почвы) не существует четких нормативов, поскольку эта величина, как уже отмечалось выше может сильно варьировать в зависимости от температуры, влажности, а также иных физических и физико-химических процессов в почве и интерпретировать его с чисто биологических (физиологических) позиций было бы неправильно. Тем не менее принято считать, что дыхание меньше 100-200 мгCO_2/м$_2$/час является низким, и оно может быть в почвах либо в периоды неблагоприятных гидротермических условий (засуха, холод), либо из-за плохого

качества почвогрунта (бедность органическим веществом, загрязненности, чрезмерной уплотненности и т.д.). Высокая интенсивность дыхания характеризуется величинами потоков диоксида углерода порядка 1000 мгCO_2/$м_2$/час и выше. Такие значения возникают в минеральных почвах лишь при оптимальных гидротермических параметрах, обогащенности органическим веществом, а в целом свойственны скорее органогенным почвенным объектам (торфу, подстилкам, свежему опаду). Промежуточные значения с модой порядка 400-600 (800) мгCO_2/$м_2$/час наиболее вероятны для зональных дерново-подзолистых почв умеренных климатических условий, а также их городских аналогов при условии отсутствия сильной антропогенной нагрузки. Для поглощения CO почвами нормативов, даже ориентировочных пока нет, и здесь можно было проводить лишь сравнительный анализ разных вариантов почвенных конструкций с контрольными участками.

3.5. Методика оценки биометрических показателей и запаса фитомассы травянистой растительности.

Поскольку основной целью создания почвенных конструкций в антропогенных условиях является устойчивое функционирование зеленых насаждений, в ходе экспериментов необходимо было осуществлять контроль за параметрами их роста и развития. Эта процедура проводилась по общепринятым в экологии классическим методикам [Программа и методика…, 74] и включала визуальную оценку (фотографирование состояния участка), биометрию отдельных органов растений, а также определение их сырой и сухой фитомассы. В исследованиях на территории стран Персидского залива к подобной оценке добавлялась колориметрия хлорофилла в ацетоновом экстракте свежескошенной травянистой фитомассы по рецептуре арабских коллег со станции садоводства и озеленения муниципалитета Дубаи.

На учетных делянках известной площади осуществлялось ручное скашивание надземной фитомассы растений с последующей транспортировкой в лабораторию, взвешиванием и сушкой в щадящем режиме до 90^oC. На ряде объектов растения не скашивались, а выкапывались из почвы с

корнями для учета подземной фитомассы. В лаборатории осуществлялась отмывка растений от почвогрунта в баке со стоячей водой, после чего линейкой измерялась высота травостоя и длина корней (биометрия). Далее растения помещались на жестяной поднос для удаления излишков влаги, после чего производилось первое взвешивание для определения сырой фитомассы. На фото 9 (см Приложение) приведены некоторые фрагменты данной процедуры.

Взвешенные и измеренные растения оборачивались крафт-бумагой с необходимой маркировкой для их последующей идентификации и закладывались в сушильный шкаф, заранее установленный на режим нагрева в пределах 90^{o}C.

По прошествии суток термообработки производилось первое (контрольное) взвешивание растений, однако и визуальный контакт и последующий весовой контроль обычно показывали, что этого времени оказалось недостаточно, для доведения фитомассы до абсолютно сухого состояния. Лишь на следующий день растения окончательно высыхали. Перед взвешиванием с корней окончательно удалялся почвогрунт и частички почвомодификаторов (сухого геля и торфа), которые после потери влаги и коагуляции при термообработке потеряли связь с корнями и легко осыпались при встряхивании. До этого, удалить прочно сцепленные с корневой массой комки гидрогеля и торфа не было возможности (фото 9). В результате сухая фитомасса оказывалась значительно ниже, чем влажная, не только из за удаления влаги, но и окончательной очитки корней от грунта и почвомодификаторов. После взвешивания сухих растений от них отделялись корни и отдельно учитывалась масса сухого травостоя и корневых систем.

Расчет фитомассы (Ф) на площади 1м^2 производился в случае объектов, где скашивались все растения со стандартной метровой площадки просто по значению полученного веса, а в случае объектов с отличными от 1м^2 площадями по формуле:

$$Ф=10000m/S_t , \qquad (3.5)$$

где, m – вес сырой или сухой фитомассы в г, S_t – учетная площадь, см^2, 10000 – переводной коэффициент площади 1 м^2 в см^2. После оценки запасов на 1 м^2, осуществлялся пересчет на стандартную площадь в 1 га с переводом кг в центнеры.

ГЛАВА 4. Лабораторные исследования почвогрунтов, почвенных материалов и их комбинаций для обеспечения технологий конструирования.

4.1. Влияние синтетических и природных полимерных материалов на водоудерживающую способность и структурное состояние почвенных субстратов.

В начале раздела рассмотрим варианты влияния биополимеров на ОГХ почв с помощью традиционных методов исследования. Общепринятые методы получения ОГХ (капилляриметрия, тензиометрия) позволяют производить оценку этой характеристики в относительно ограниченном диапазоне потенциалов (давлений) почвенной влаги, не превышающих по модулю 70-90 кПа. Однако, для почв легкого гранулометрического состава таких величин сосущей силы вполне достаточно чтобы удалить основное количество влаги – до 80-90% от потенциальной водовместимости. Ниже анализируются результаты таких исследований для простейших грубодисперсных систем в виде кварцевого песка, модифицированных с помощью сильнонабухающих полимерных гидрогелей (СПГ) в виде радиационносшитого полиакриламида

Поведение СПГ в грубодисперсных модельных пористых средах, состоящих из частиц кварцевого песка фиксированных размеров, представляет определенный интерес в связи с потенциальным ингибированием способности гелей к набуханию в реальном поровом пространстве почвы из за его ограниченности. В качестве модельных сред были использованы отсеянные фракции полидисперсного стекольного кварцевого песка размерами 0,5-1мм, 0,25-0,5мм и < 0,25мм, соответственно. Их ОГХ, полученные капилляриметрическим методом, представлены на рис.4.1. Весьма сильные различия во влажности проявлялись в области близкой к насыщению почвы. По мере дренирования образцов они сглаживались, и при потенциале влаги 14,7 Дж/кг, который, согласно концепции Воронина, является граничным значением между капиллярной и

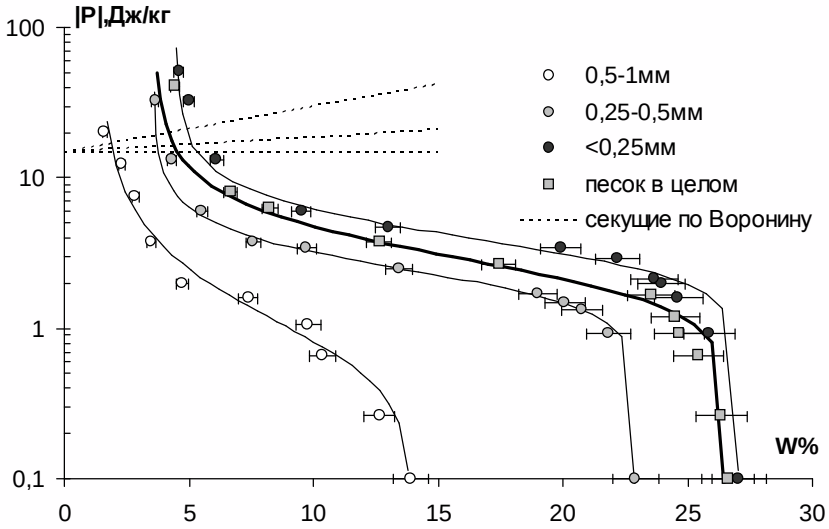


Рис.4.1. ОГХ фракций кварцевого песка разных размеров.

капиллярно-гравитационной влагой, разница во влажностях не превышала 2-3%. Как и следовало ожидать, наименьшими величинами влагоемкости характеризовалась фракция самых крупных размеров 0,5-1мм. Ее полная влагоемкость составляла порядка 14%, а НВ (МКСВ по Воронину) не более 2%. Влажность точки перегиба на ОГХ, которую есть основания отождествлять с капиллярной влагоемкостью, была близкой к ПВ и равнялась 11,5%. Промежуточная фракция 0,25-0,5мм обладала заметно более высокой водоудерживающей способностью, в связи с чем ее ОГХ закономерно сдвигалась в сторону больших значений капиллярно-сорбционного потенциала и равновесных влажностей (вправо, относительно предшествующей ОГХ более крупных размеров частиц). В результате ПВ здесь достигала 23%, КВ – 17%, а НВ (МКСВ) – 3,7% . Еще большее смещение ОГХ наблюдалось для фракции самых малых размеров (<0,25мм) (рис.4.1). Здесь полная, капиллярная и наименьшая влагоемкости составляли 27, 20 и 5%, соответственно. Собственно кварцевый песок как полидисперсная система, состоящая из анализированных выше отдельных фракций, характеризовался ОГХ, занимающей промежуточное положение между таковыми для фракций

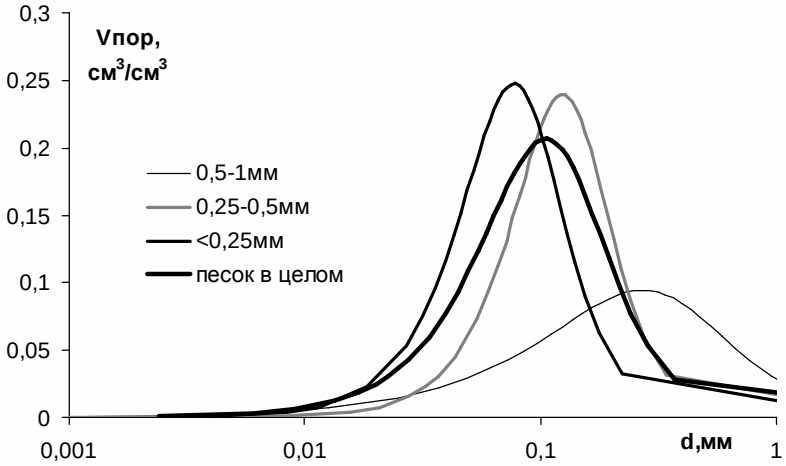


Рис. 4.2. Распределение пор по размерам для различных фракций кварцевого песка.

размером 0,25-0,5мм и <0,25мм. Его полная и капиллярная влагоемкости были близки к таковым для фракции <0,25мм и составляли 27%, 20%, а наименьшая (МКСВ) была несколько ниже – 4,4%. Заметим, что ММВ (ВРК), определенная методом секущих по Воронину для всех исследованных образцов значимо не отличалась от НВ(МКСВ), поэтому ее значения не были приведены в анализе.

Аппроксимация ОГХ функцией ван-Генухтена позволила получить посредством аналитического дифференцирования структурные кривые распределения объемов пор по их размерам, приведенные на рисунке 4.2. Как видно распределения отражали сами размеры фракций и, вероятно их отсортированность. Наибольшие размеры доминирующих пор отмечались во фракции 0,5-1мм, где максимум (экстремум) распределения приходился на диаметр пор в 0,26-0,27 мм. Наименьшими величинами доминирующих размеров пор (0,07-0,08 мм) характеризовалась, как и следовало ожидать, фракция <0,25 мм. Фракция средних размеров 0,25-0,5 мм закономерно занимала промежуточное положение, и экстремум распределения приходился здесь на диаметр пор порядка 0,12-0,13 мм. Собственно кварцевый песок имел распределение пор как и ОГХ промежуточное между таковыми для фракций <0,25

мм и 0,25-0,5мм (рис.4.1, 4.2). Такое положение также вполне закономерно, поскольку по данным просеивания исследуемый песок содержал 60% частиц размером менее 0,25 мм, 35% частиц от 0,25 до 0,5 мм, и только 5% элементов крупной фракции 0,5-1мм.

Полученные характеристики в целом близки к приводимым в литературе эффективным размерам пор песчаных фракций в 0,17 мм для среднезернистого песка (0,25-0,5мм) и 0,09 мм для мелкозернистого песка (0,1-0,25 мм), согласно [Гаель, Смирнова, 99]. Характерные размеры порового пространства исследуемых фракций имеют значение при оценке поведения СПГ в них, поскольку локализация и последующее набухание частичек геля происходит в порах и может подавляться при наличие обжимающего давления вышележащих слоев почвы, превышающего давление набухания [Казанский и др., 86, Лагутина и др., 95, Лагутина, 96].

При внесении гидрогеля в почвы его частицы, как уже отмечалось выше, должны располагаться в поровом пространстве. В результате степень набухания геля (количество воды, поглощенное единицей массы) будет зависеть как от свойств самого геля, так и от почвенных условий. В литературе есть сведения, что в почвенных условиях данная величина, как правило ниже, чем при свободном набухании в избытке дистиллированной воды, поскольку присутствие легкорастворимых солей - электролитов в поливных водах и почвенных растворах, давление вышележащих слоев почвы на частицы геля, их взаимодействие с твердой фазы почв могут уменьшать набухание СПГ [Нурыев и др., 86]. Для проверки этих положений и уточнения количественных характеристик набухания в лабораторных условиях были изучены ОГХ описанных выше модельных пористых сред с добавками СПГ. Были использованы дозы гидрогеля 0,012, 0,05 и 0,2% от массы вмещающего субстрата при размерах частиц геля 0,1-0,2 мм, соизмеримых с характерным размером доминирующих в структуре фракций пор. В отдельном эксперименте были взяты более крупные частицы сухого гидрогеля размером 0,25-1мм.

Рассмотрим закономерности влияния СПГ на водоудерживающую способность и структурную организацию

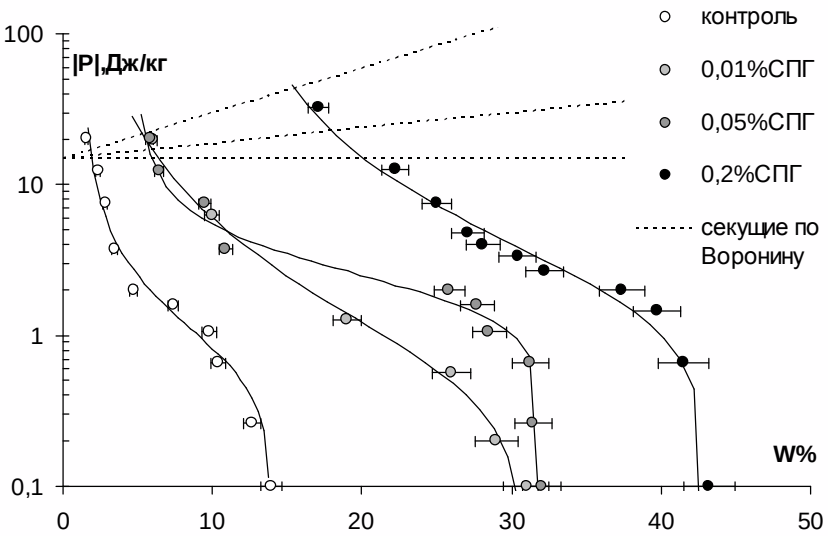


Рис. 4.3. ОГХ песчаной фракции 0,5-1мм под воздействием СПГ размером 0,1-0,2мм.

грубодисперсных пористых сред в виде фракций фиксированных размеров. Начнем анализ с наиболее крупной фракции 0,5-1мм, имеющей минимальные характеристики водоудерживания. На этом фоне даже малые добавки СПГ 0,01-0,05% дали ощутимые результаты (рис.4.3). При использовании СПГ размером частиц 0,1-0,2 мм, соизмеримых с доминирующими порами модельной среды в 2-4 раза возросла полная (до 30-50%) и капиллярная (25-40%) влагоемкости и в 2-2,5 раз НВ (до 4-6%). При этом размер доминирующих пор в структуре сохраняется в большинстве случаев прежним (0,23-0,27 мм) (рис. 4.4). То есть гель не менял кардинальным образом структуру пористой среды, увеличивая влагоемкость преимущественно за счет собственного набухания и разрыхления (рост ПВ, КВ) песчаного субстрата. Характерно, что, несмотря на большой разброс данных в области насыщения почвы влагой, наименьшая влагоемкость субстрата с малыми добавками СПГ 0,01-0,05% была во всех случаях практически одинакова (4,5-5,5%) и значимо не различалась. Из работ [Дубровский и др., 90,Лагутина и др., 95, Лагутина, 96] по измерению давления свободного набухания разнообразных

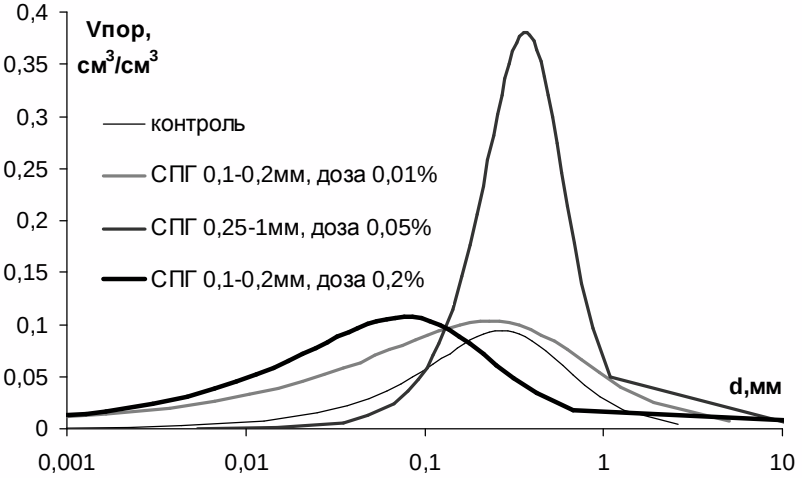


Рис. 4.4. Распределение пор по размерам для песчаной фракции 0,5-1мм под воздействием СПГ.

слабосшитых гелей следует, что уже при небольших разряжения порядка 3-5(10) кПа СПГ теряют основную часть влаги. Поэтому в грубодисперсных средах с большим размером пор СПГ в малых концентрациях вначале развивает максимальную степень набухания (600-1000 гH_2O/г и более), обеспечивая очень высокое увеличение ПВ и КВ, а потом быстро теряет влагу на начальных стадиях разряжения.

С технологической точки зрения интересен тот факт, что гель с исходно большими размерами зерен (0,25-1мм), превышающими характерный размер пор, давал стабильно большую влагоемкость (в 1,5-2 раза) по сравнению с теми же дозами тонко помолотого СПГ (0,1-0,2 мм) (рис. 4.3 и 4.5). По-видимому, тонкие частицы геля, попадая в поровое пространство, были разобщены и набухали каждая по отдельности, испытывая ограничения со стороны твердой фазы субстрата (стенок пор). Тогда как частицы крупных размеров, соизмеримые с песчинками, имея исходно большие объем и массу, при набухании расширяли вокруг себя необходимое пространство, обеспечивая более высокие значения водовместимости и капиллярной влагоемкости среды.

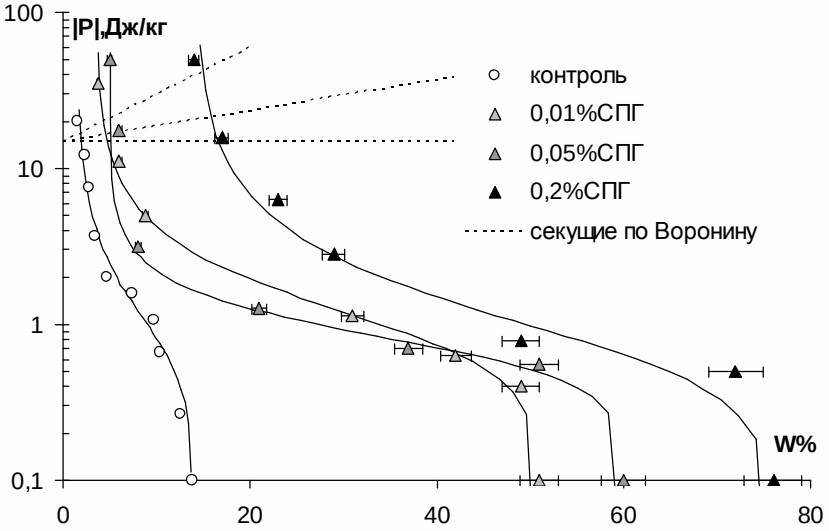


Рис. 4.5. ОГХ песчаной фракции 0,5-1мм под воздействием СПГ размером 0,25-1мм.

Эта закономерность повторилась и при максимальной дозе СПГ в 0,2% (рис. 4.3 и 4.5). Значит, на практике использовать специальные тонко размолотые частицы СПГ нет смысла, что означает сокращение затрат на подготовку геля посредством дробления стекловидной массы – продукта радиационного сшивания полимера.

Малые дозы СПГ 0,01-0,05%, очевидно нельзя признать удовлетворительными, поскольку их кажущаяся эффективность по увеличению влагоемкости субстрата в области насыщения (ПВ, КВ), очень быстро сходит на нет уже при первых небольших разряжениях (рис. 4.3 и 4.5). Весьма вероятно, что часть геля в крупнопористой среде, находясь в состоянии предельного набухания (1000 гH_2O/г и более), не только теряет воду при перепаде давления, но и начинает сама перемещаться в виде вязкого раствора. Попадая на фильтр капилляриметрической установки, гель кольматирует тонкие поры, приводя к кажущемуся увеличению влагоемкости образца. Этот механизм объясняет практически одинаковые результаты по наименьшей влагоемкости при малых дозах СПГ,

различающихся в пять раз (0,01 и 0,05%).

Вместе с тем применение максимальной концентрации СПГ (0,2%) равномерно увеличивает влагоемкость грубодисперсного субстрата во всем диапазоне давлений до величин в 4-6(9) раз превышающих таковые в исходной пористой среде (рис. 4.3 и 4.5). Как видно, значительно возрастает не только ПВ и КВ, но и самое главное – наименьшая влагоемкость, достигающая здесь величин 15-18%, против 2 в исходной песчаной фракции. Такие величины НВ свойственны супесям и легким суглинкам [Шеин, 2005], что означает «перевод» водоудерживающей способности несвязного песка как минимум на 2 градации по гранулометрическому составу при весьма небольшом количестве добавляемого органического вещества (0,2%). Как видно 0,2% доза меняет и исходную структуру порового пространства. Максимум, отражающий размеры доминирующих пор, смещается в сторону меньших диаметров (0,08 мм против 0,27), что означает распространение в субстрате сети тонких макропор, обладающих капиллярными эффектами и удерживающих значительную часть ранее подвижной гравитационной влаги (рис. 4.4). Если сформировать слой такой смеси на исходном грубодисперсном субстрате (подложке) с крупными макропорами (>0,25мм), капиллярная связь разорвется и можно будет «подвесить» поливную влагу, минимизировав непродуктивные потери на гравитационное стекание.

Итак, в грубодисперсных пористых средах эффективная концентрация геля должна быть порядка 0,1-0,2%, но не меньше. Гель не реализует при этом свою максимальную степень набухания и характеризуется величинами набухания порядка 200-400%, что удерживает его от гравитационного перемещения в виде вязкого раствора в крупных порах структуры, и вместе с тем позволяет сформировать высокую водоудерживающую способность в пористой среде.

При переходе к фракциям более тонких размеров, выявленные тенденции влияния СПГ на водоудерживающую способность и структурную организацию физических сред сохранились, однако при этом появились особенности, характерные для данного класса почвенных объектов (рис. 4.6-

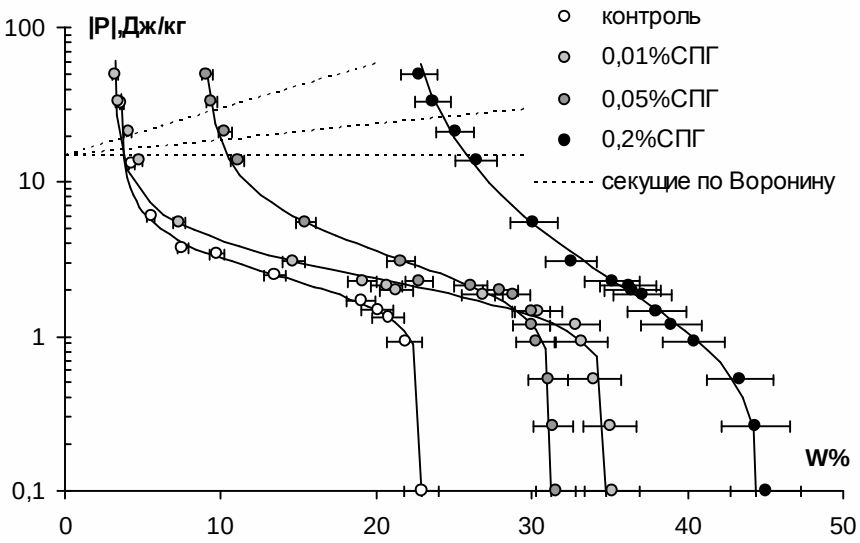


Рис. 4.6. ОГХ песчаной фракции 0,25-0,5мм под воздействием СПГ размером 0,1-0,2мм.

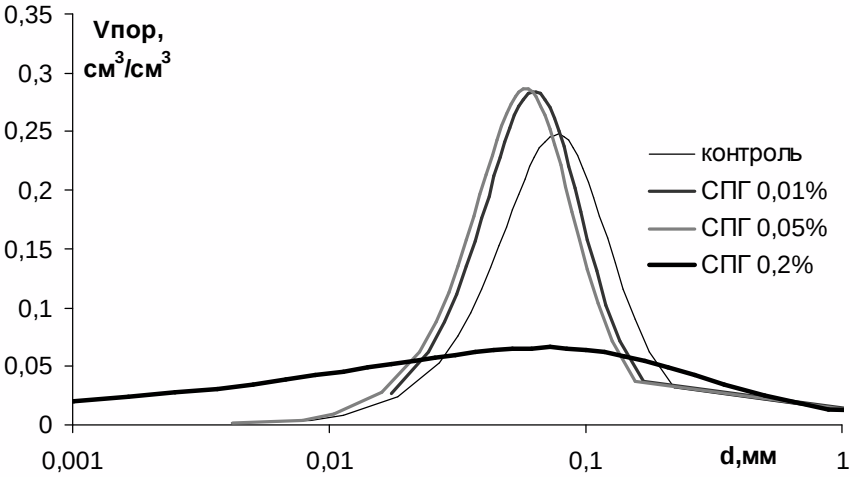


Рис. 4.7. Распределение пор для песчаной фракции 0,25-0,5мм под воздействием СПГ размером 0,1-0,2мм.

3.9).

Из экспериментальных результатов видно, что увеличение влагоемкости в данных фракциях не столь высокое, как в рассматриваемой ранее грубодисперсной среде с максимальными размерами частиц 0,5-1мм. Так для фракции 0,25-0,5мм полная и капиллярная влагоемкости возросли под воздействием СПГ в среднем в 1,5-2 раза, достигнув 30-45 и 26-42%, соответственно, против исходных 17-23% (рис. 4.6). Наименьшая влагоемкость при минимальной дозе СПГ 0,01% фактически не изменилась (3,7%), а при более высокой (0,05%) возросла в 2,7 раза, достигнув значения 10%, характерного в природе для супесчаных почв [Гаель, Смирнова, 99, Шеин, 2005]. При максимальной дозе СПГ 0,2% от массы песка НВ увеличилась в 6-6,5 раз, достигнув уровня суглинистых почвенных объектов (24-24,5%). При этом размер доминирующих пор в структуре модельной среды практически не меняется, оставаясь в диапазоне 0,1-0,13 мм (рис. 4.7). Поскольку в данном опыте используется гель с минимальными размерами частиц 0,1-0,2 мм, можно предположить, что частицы здесь также локализовались внутри существующей пористой структуры, испытывая ограничение со стороны твердой фазы и несколько снижая плотность среды (разрыхляя субстрат) при максимальном набухании.

Еще большее сопротивление набухание проявляется во фракции минимального размера (<0,25мм) (рис. 4.8 и 4.9). Как видно, при использовании мелких частиц геля в дозах 0,01-0,05% полная, капиллярная и наименьшая влагоемкости полученных смесей значимо не отличались от контроля, и лишь применение максимальной дозы СПГ 0,2% позволило в значительной мере (до 4 раз) повысить НВ среды, доведя ее до уровня суглинистых почв (21-22%). Полная и капиллярная влагоемкости при этом возросли не более чем в 1,5-1,8 раза на фоне сохранения прежнего размера доминирующих в структуре пор (0,06-0,08 мм) (рис. 4.9). То есть, гель в большой дозе здесь не привел к сколь либо существенной перестройке структуры порового пространства системы, увеличив лишь ее водоудерживающую способность, особенно в области НВ, за счет набухания собственных частиц. С этим связано и очень значительное расширение пика распределения пор с распространением в область мезо и микро пор 1-10 мк при

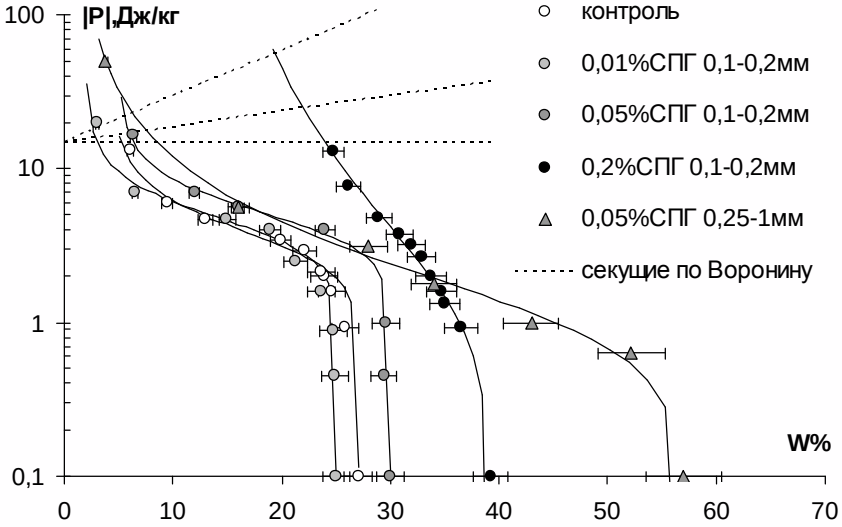


Рис. 4.8. ОГХ песчаной фракции <0,25мм под воздействием СПГ разных размеров.

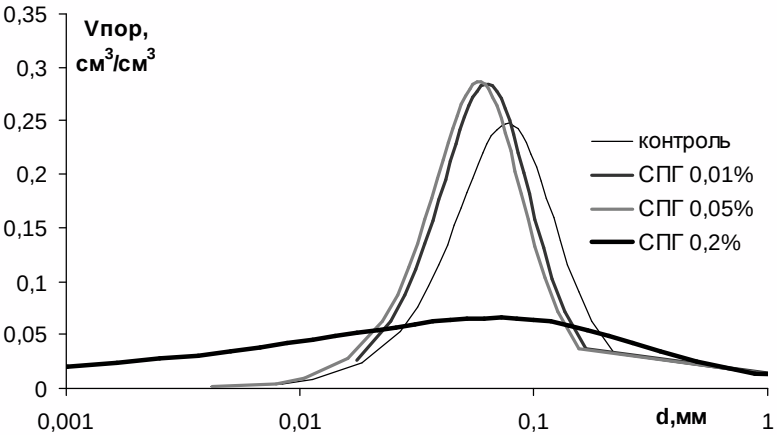


Рис. 4.9. Распределение пор для песчаной фракции <0,25мм под воздействием СПГ разных размеров.

сохранении положения его максимума (рис.4.9).

Собственно гель как коллоидное тело имеет весьма плавную характеристику водоудерживания без каких либо перегибов [Дубровский и др., 90, Лагутина, 96], поскольку при удалении влаги в его структуру не входит воздух, а она лишь сжимается (подвергается усадке) на величину удаленного объема влаги.

Характерно, что использование СПГ крупных размеров (0,25-1мм) как и ранее в наиболее грубодисперсной пористой среде позволило здесь сильно увеличить влагоемкость даже в малой дозе 0,05% (рис.4.8). Если такая же доза, но тонко помолотого геля, как уже отмечалось, не привела к сколь либо заметным измерениям, то использование крупных частиц СПГ сопровождалось возрастанием величин ПВ и КВ в 2-2,5 раза, а НВ – втрое против исходных характеристик. Этот факт согласуется с предложенным выше объяснением, согласно которому набухание разобщенных мелких частиц внутри порового пространства сдерживается со стороны твердой фазы (стенок пор) субстрата, тогда как более крупные частицы, равные по размерам песчинкам или превышающие их, способны развивать свой потенциал набухания в гораздо большей мере. Так степень набухания крупных частиц геля при концентрации 0,05% в состоянии ПВ достигала предельных величин (1140-1200 гH_2O/г) в обоих исследованных случаях – и в грубодисперсной (0,5-1мм) и в тонкодисперсной (<0,25мм) фракциях песка. Тонкозернистые же частицы СПГ при данной концентрации набухали лишь наполовину от потенциальной степени, не превышая значений 600-640 гH_2O/г. Акцентируем на этом внимание еще раз, поскольку с технологической точки зрения эффективнее вносить гель не измельченный до размеров порового пространства, а с большим размером зерен. В дальнейшем буде показано, что еще более технологичный способ – внесение не сухого, а предварительно набухшего в чистой воде геля, который и равномернее распределяется при смешивании с песчаным субстратом и уже заранее реализует свою способность к набуханию в отсутствии каких-либо ограничений.

Отметим, что тезис о значительном возрастании наименьшей влагоемкости во всех исследованных фракциях под

Таблица 4.1 Сопоставление значений НВ, полученных разными методами.

Размер СПГ, мм	Фракция песка, мм	Доза СПГ, %	НВ по ОГХ, %	НВ методом трубок,%
0,1-0,2	<0,25	0	5,1	11,6
		0,01	4,9	13,9
		0,05	5,9	19,5
		0,2	22	22,3
	0,5-1,0	0	1,9	2,8
		0,01	6,0	16,0
		0,05	5,7	19,0
		0,2	15,9	20,1
0,25-1	<0,25	0	5,1	11,6
		0,01	-	13,3
		0,05	15,9	20,5
		0,2	-	24,1
	0,5-1,0	0	1,9	2,8
		0,01	4,6	13,0
		0,05	5,1	-
		0,2	15,9	-

- не определялось.

воздействием максимальной дозы СПГ 0,2% подтвердился и при использовании не зависимого метода оценки – по остаточной влажности при свободном оттоке влаги из почвенных образцов в стеклянных колонках (метод трубок по [Вадюниной, Корчагиной, 86]) (табл.4.1). Вместе с тем этот метод дал стабильно более высокие влагоемкости по сравнению с расчетом по ОГХ для фракции с минимальными размерами частиц (<0,25мм) и практически для всех малых доз СПГ (0,01-0,05%). Объяснить этот факт можно, если принять нашу точку зрения на суть НВ как предельно-равновесного состояния между капиллярными силами, удерживающими воду в почве и силой тяжести, стремящейся удалить ее [Смагин, 2003] (см. главу 2, рис. 2.2). Последняя будет зависеть от мощности единого водного тела, способного к гравитационному стеканию, в данном случае тождественной высоте колонки. Если гравитационное давление, превышает водоудерживающую способность со стороны макрокапиллярных сил, вода будет

продолжать стекать, пока не установится равновесное состояние, соответствующее НВ. В противном случае сила тяжести не сможет удалить всю потенциально подвижную капиллярно-гравитационную воду и остаточная влажность в колонке будет заведомо выше НВ. Так фракция 0,5-1мм имеет меньший капиллярный потенциал по сравнению с таковым для более тонких частиц <0,25 мм, поэтому НВ в трубке близка к таковой, оцененной по ОГХ. Для фракции <0,25 мм, обладающей большим капиллярным потенциалом, водного столба в 10 см недостаточно, чтобы удалить всю капиллярно-гравитационную влагу и остаточная влажность здесь минимум вдвое превышает расчетную НВ. Наконец прибавление СПГ еще увеличивает капиллярно-сорбционный потенциал системы, пропорционально дозе кондиционера. В результате при максимальном содержании геля НВ трубок и расчетная НВ становятся практически одинаковыми и близкими к водовместимости исходного песка, поскольку под действием силы тяжести в трубке или разряжения в капилляриметре удаляется лишь небольшая часть влаги, а набухшие частицы геля, заполняя все поровое пространство системы, обеспечивают ей максимальное водоудерживание.

Данный эксперимент имеет два следствия методического характера. Во-первых, он подтверждает высказанное ранее предположение о возможности подвешивания влаги в грубодисперсных пористых средах в корнеобитаемом рабочем слое 0-10см при дозе СПГ 0,2% с минимальными потерями поливных вод на гравитационный отток вглубь почвы [Смагин и др., 2008, 2009]. Во-вторых – показывает на недостаток метода трубок для оценки НВ, практически во всех почвах, если это только не гравий с капиллярным поднятием ниже 10см. Только при использовании высоких колонн, превышающих высоту капиллярного поднятия, можно в лабораторных условиях получить значения НВ, близкие к полевым. Использование высоты капиллярного поднятия в качестве секущей на ОГХ, дает возможность более точно, чем в методе Воронина определять НВ, особенно для почв легкого гранулометрического состава и слоистых почвенных конструкций. [Смагин, 2003, Смагин и др., 2008].

Из других почвенно-энергетических констант, помимо НВ

методом секущих по Воронину были оценены максимальная молекулярная влагоемкость (ММВ) или ее аналог в макропористых средах – ВРК. Статистически значимых отличий этой величины более чем на 1% от НВ во всех исследованных фракциях более чем на 0,5-1% при дозах СПГ 0-0,05% не наблюдалось. И лишь при максимальной концентрации геля в 0,2% появлялись четкие отличия ММВ от МКСВ (НВ) в 3-4 весовых процента. Эти величины возрастали от исходных значений в песчаных субстратах порядка 2-3% до 15-20%.

Данный факт существенен с технологической точки зрения, поскольку ММВ является влажностью оптимальной при обработке почвы, обеспечивая минимальную уплотняемость со стороны техники и максимальную крошимость агрегатов до агрономически ценных размеров [Воронин, 84, 86]. Близость ММВ к значениям НВ и в свою очередь к водовместимости обычных песчаных почв (20-25%) показывает, что обработку песков, кондиционированных дозой порядка 0,2%СПГ теоретически можно проводить во влажном состоянии, после поливов, не вызывая особой техногенной нагрузки на поверхность почвы.

Влияние СПГ на плотность грубодисперсных пористых сред (ρ_b) по сути уже было рассмотрено при анализе величин ПВ. Поскольку плотность твердой фазы песчаных субстратов (ρ_s) не могла измениться при ничтожных добавках органического вещества в 0,01-0,2%, расчет величин плотности сложения можно было проводить по данным о ПВ с использованием известной в физике почв формулы $ПВ=100(1/\rho_b–1/\rho_s)$ и постоянного значения плотности твердой фазы кварца в 2,65 г/см^3. В результате оказалось, что при больших дозах СПГ плотность в состоянии максимального насыщения влаги снижалась от исходных величин 1,45-1,6 г/см^3 в контроле до 0,88-1,3 г/см^3, благодаря внутреннему разрыхлению при набухании СПГ. По видимому, помимо разрыхления почвы, СПГ будет способствовать проникновению в нее корней еще и по причине увлажнения и формирования свого рода гелевой смазки, что весьма важно для жестких структур типа песчаных почв, обладающих как известно максимальной твердостью и сопротивлением пенетрации со стороны корней и обрабатывающих орудий [Гаель, Смирнова,

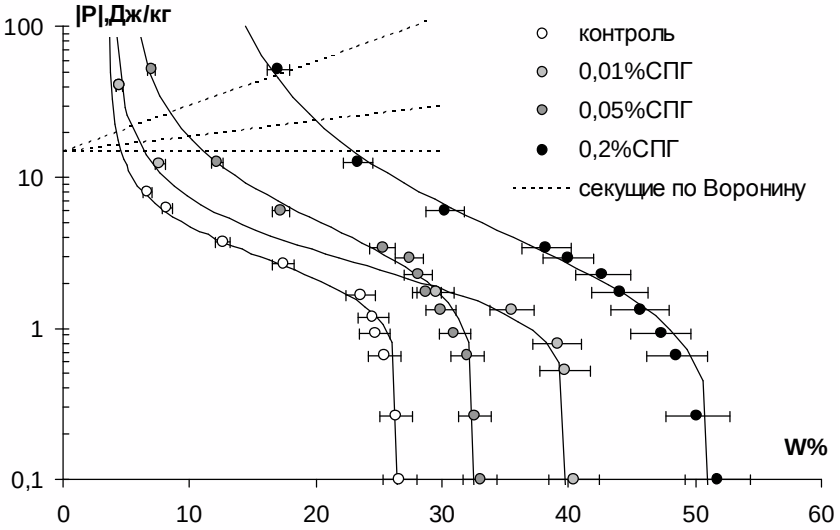


Рис. 4.10. ОГХ кварцевого песка под воздействием СПГ размером 0,1-0,2мм.

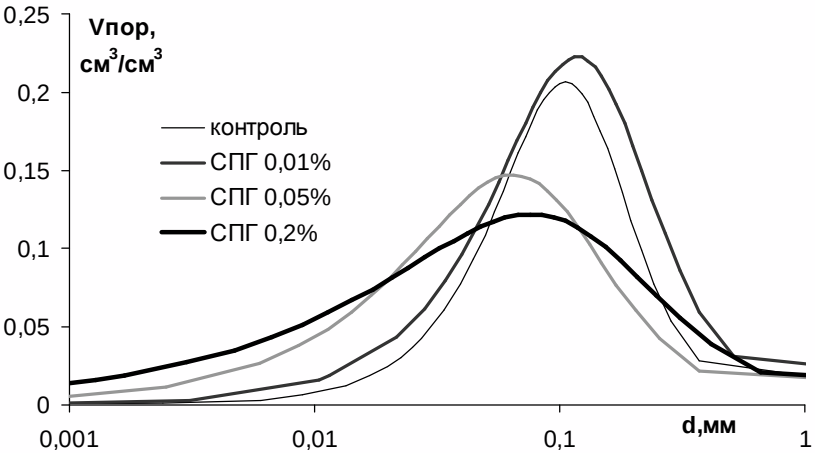


Рис. 4.11. Распределение пор для кварцевого песка под воздействием СПГ размером 0,1-0,2мм.

99]. Таким образом, при использовании СПГ можно, по-видимому, минимизировать механическую обработку почвы и

регулировать ее плотность лишь периодическим увлажнением, что спонтанно происходит при поливном земледелии.

Возвращаясь к оценке водоудерживания в исследуемых пористых средах, отметим, что анализ поведения кварцевого песка в целом при внесении СПГ подтвердил закономерности, полученные при рассмотрении его отдельных фракций (рис. 4.10 и 4.11). Поскольку в составе песка доминируют частицы мелких и средних размеров (<0,2мм, 0,25-0,5мм), результаты были близки к таковым для этих фракций. Так полная и капиллярная влагоемкости возрастали приблизительно в 1,5 раза по сравнению с контрольной величиной при использовании малых доз СПГ 0,01-0,05% и в 2-2,3 раза в случае максимальной дозы 0,2%, достигая значений 47-52%. Наименьшая влагоемкость среды реагировала на внесение СПГ несколько сильнее и увеличивалась в 1,5 раза при минимальной дозе 0,01%, в 2 раза при 0,05% и в 4,6 раза при 0,2% концентрации геля. При этом пик в распределении пор по размерам незначительно смещался при увеличении концентрации геля в сторону меньших размеров (от 0,1 до 0,06-0,07 мм) (рис. 4.10). По-видимому, в смеси фракций разных размеров, каковой является исследуемый песок, приобретается наименее жесткая структура с более равномерным распределением пор и более податливая к расширению при набухании в них тонких частиц СПГ.

Тем же методом (капилляриметр нулевого типа) была получена ОГХ несвязного полиминерального песка из пустыни Каракумы (ст. Репетек), близкого по дисперсности к исследованным ранее объектам (рис. 4.12). Вместе с тем наличие в его составе большего числа тонких частиц эолового генезиса, а возможно, и влияние минералогического состава, определяли здесь более высокую влагоемкость и водоудерживающую способность по сравнению с кварцевым песком. Так величины полной, капиллярной, наименьшей и максимальной молекулярной влагоемкостей здесь были равными 40,8, 32,0, 6,0, и 5,0 весовых процента, соответственно. Размер доминирующих в структуре полиминерального Каракумского песка пор характеризовался значениями эффективных диаметров порядка 0,07-0,08мм, что было несколько ниже таковых для изученного ранее кварцевого

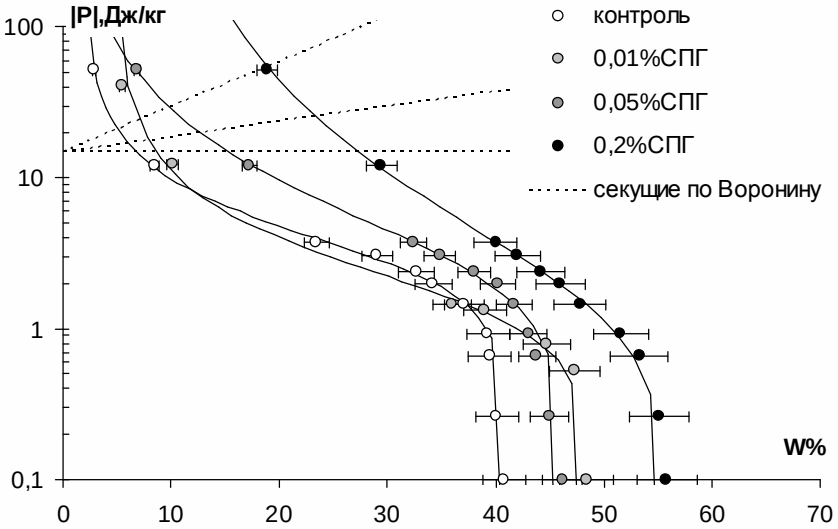


Рис. 4.12. ОГХ полиминерального Каракумского песка под воздействием СПГ.

песка и доминирующих в его составе фракций.

Внесение СПГ в значительной мере повлияло на водоудерживающую способность пустынного песка пропорционально дозе использующегося кондиционера, что отражалось закономерным смещением ОГХ относительно контроля в область повышенных значений равновесных влажностей и потенциалов почвенной влаги (рис. 4.12). Так уже при минимальной концентрации СПГ 0,01% от массы песка его полная и капиллярная влагоемкости возросли на 7-8%, достигнув, соответственно величин 48,4 и 39,8%. Еще большие различия продемонстрировали образцы с 0,05% содержанием геля. Если в области близкой к насыщению прирост влагоемкости был практически таким же (6-8 весовых %), то НВ и ММВ увеличились по сравнению с контролем практически вдвое, достигнув значений 12,7 и 9,8%, характерных в природе для связнопесчаных и супесчаных почв [Гаель, Смирнова, 99, Шеин, 2005].

Максимальная водоудерживающая способность была обнаружена в образцах с 0,2% содержанием СПГ (рис. 4.12).

Полная и капиллярная влагоемкости здесь достигли значений 55,8 и 52,5%, что на 15-20 весовых процента превышало эти величины на контроле. Наименьшая влагоемкость и ММВ возросли в 3,5-3,8 раза до величин 23,3-18,8%, свойственных природным суглинкам [Шеин, 2005]. При этом существенной перестройки в структуре порового пространства исследуемой почвы, не произошло. Максимум в распределении пор лишь немного сместился в сторону меньших диаметров (0,059-0,064мм) при использовании доз 0,05-0,2%СПГ. Вместе с тем существенно возросла доля пор размером менее 0,001мм, выполняющих функции капиллярного транспорта и сохранения влаги. Как и ранее, можно заключить, что локализованные в поровом пространстве частицы СПГ, набухая, приводили к разрыхлению почвы (увеличение полной влагоемкости), а также к росту водоудерживания, благодаря собственному потенциалу набухания, без образования агрегатной структуры и коренной перестройки исходного песчаного материала. Тенденцию роста водоудерживающей способности пропорционально содержанию СПГ хорошо отражает показатель интегральной энергии водоудерживания (Е) (см. главу 2). Его значения составили последовательный ряд от 4,0-4,3 Дж/кг твердой фазы почвы для контроля и малой дозы СПГ в 0,01% до 16,9 и 26,8 Дж/кг для доз 0,05 и 0,2%. Степень набухания геля в данном ряду постепенно падала и если при концентрации СПГ 0,05% она была к максимальной (924 гH_2O/г), то при дозе 0,2% эта характеристика не превышала 280 гH_2O/г, что гарантировало отсутствие текучести геля в пористой среде.

Следующий субстрат – образец пустынной пылевато-песчаной карбонатной почвы из эмирата Дубаи продемонстрировал наибольшие изменения водоудерживающих характеристик под воздействием СПГ (рис.4.13). Исходные качества песка (ПВ=32%, КВ=27%, НВ=10%, ММВ=9%) позволяют отнести его к разряду высоковлагоемких, близких к супесям по [Гаель, Смирнова, 99]. Пропорционально концентрации СПГ возросли не только величины водовместимости (до 60-64%) и КВ (до 52-60%), но и наименьшая и максимальная молекулярная влагоемкости, достигая при 0,1% СПГ уровня тяжелосуглинистых или обогащенных органическим веществом черноземных почв (32-

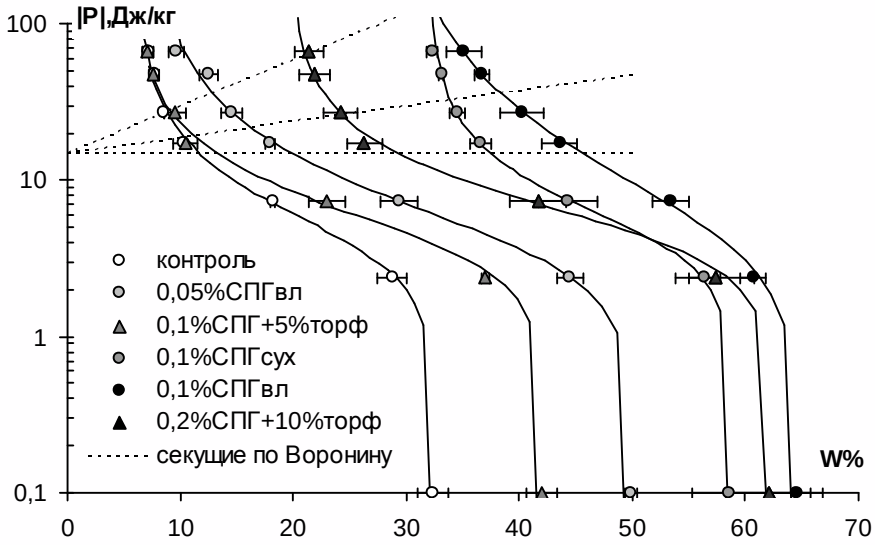


Рис. 4.13. ОГХ пылевато-песчаной аридной почвы (Дубаи) под воздействием СПГ и низинного торфа (тензиометрия).

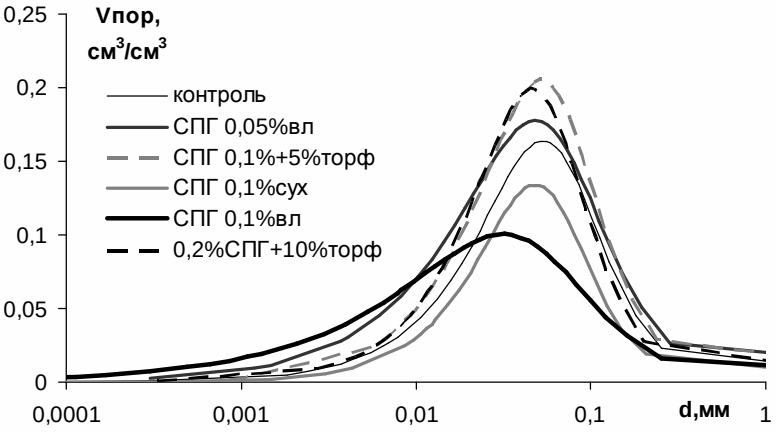


Рис. 4.14. Распределение пор для пылевато-песчаной аридной почвы (Дубаи) под воздействием торфа и СПГ.

38%). При этом размер доминирующих пор в структуре исследуемых композиций оставался практически неизменным, варьируя в диапазоне 0,04 - 0,055 мм, что указывает на

равномерные приращения пористости и влагоемкости как в области насыщения, так и в диапазоне капиллярной и пленочной влаги (категории НВ-ММВ) (рис.4.14). Есть основания полагать, что при внесении СПГ удалось достигнуть достаточно равномерного его распределения между отдельными пылеватыми частицами твердой фазы гидрофильного характера. При иссушении эти частицы не входили в плотное взаимодействие (контакт) друг с другом, будучи разделенными пленками покрывающего их геля и образуя своеобразную дисперсную систему, устойчивость которой зависит от устойчивости гелевых пленок. В результате варианты смеси геля с торфом, исследуемые как потенциальные композиции для почвенных конструкций, на базе данного субстрата, продемонстрировали несколько неожиданное с позиций классической капиллярной теории поведение (рис. 4.13). При относительно высокой водовместимости (40-60%) их наименьшая и максимальная молекулярная влагоемкости упали до фоновых значений (9-11%) при смеси 0,1% СПГ и 5% торфа или были в 1,5 раза ниже таковых в песке с 0,1% дозой СПГ для казалось бы максимально эффективной композиции 0,2% СПГ и 10% торфа.

Предлагаемая гипотеза, основанная на представлениях о конкурентных молекулярных и ионно-электростатических взаимодействиях твердой и жидкой фаз почвы [Смагин, 2003], позволяет объяснить эти неожиданные факты, поскольку внесение гидрофобного органического вещества в виде торфа и (или) гумуса в гидрофильную систему «почва-гель» приводит к потере устойчивости пленок геля и коллапсу структуры с возникновением непосредственного (твердого) контакта частиц и с неизбежной потерей водоудерживания. Интересен с технологической точки зрения и еще один экспериментальный факт. Определенный уровень засоления (ЕС= 4-5 дСм/м) в данном образце не повлиял в особенной мере на способность СПГ к поглощению влаги, и значения степени набухания СПГ были близкими к таковым в предшествующих экспериментах с незасоленными образцами, варьируя от 1000 гH_2O/г при 0,05% концентрации СПГ до 590-650 гH_2O/г при дозе 0,1%. Как и в опыте с кварцевым песком внесение СПГ в частично набухшем состоянии по сравнению с использованием сухого порошка,

привело к статистически достоверному приросту влагоемкости во всем диапазоне варьирования потенциалов почвенной влаги на 5-7 весовых процента (рис. 4.13).

Резюмируя результаты классической оценки водоудерживающей способности и физического состояния данной серии образцов, можно заключить, что для различных по генезису, составу и дисперсности почв было выявлено существенное увеличение водоудерживающей способности, соответствующее при дозах порядка 0,1-0,2% СПГ переводу почвы на 1-3 градации по гранулометрическому составу в сторону утяжеления последнего. Способ внесения СПГ в предварительно увлажненном (набухшем) состоянии предпочтителен по сравнению с сухими смесями, поскольку гель распределяется в образце равномернее и формирует исходно более высокую влагоемкость композиции, сохраняющуюся при удалении влаги. Смешивать гидрофильный гель с гидрофобным органическим веществом (торф) и по-видимому, иными ПАВ нельзя, поскольку при этом резко падает способность композиции удерживать воду. Однако, как и в случае борьбы с осмотическим механизмом снижения набухания гелей (разрушение ионно-электростатического барьера) посредством введения в полимерную матрицу ионогенных групп, здесь можно при синтезе СПГ помещать в их структуру амфифильные вещества (например, гуматы) для усиления ПАВ-барьера. Такая технология была апробирована коллегами из ИТХ УрО РАН и полученные ими гели с гуматами вполне успешно набухали в почвах и почвогрунтах с большим содержанием гумуса, включая черноземы [Стрельников и др., 2007, Будников и др., 2010].

Продолжая анализ, отметим, что интегральная энергия водоудерживания исследуемых образцов, отражает тенденцию роста водоудерживающей способности по мере увеличения дисперсности и содержания органических полимеров в почвах легкого гранулометрического состава и варьирует от 3,4-4 Дж/кг в кварцевом песке до 15-30 Дж/кг в связнопесчаных и супесчаных субстратах и до 20-40 Дж/кг при концентрациях 0,1-0,2% СПГ. Невыясненным остался вопрос увеличения ВЗ при внесении 0,05-0,2% доз геля, которое может нивелировать эффект от роста НВ для диапазона продуктивной влаги (НВ-ВЗ).

В большинстве экспериментов с влагоемкими субстратами, включая последний, ориентировочная оценка ВЗ в композициях с гидрогелем достигала значений 15-25% и более, приближающимся к таковым для НВ, что ставит под угрозу вывод об эффективности СПГ для оптимизации водного режима растений. Поэтому далее данная проблема будет рассмотрена отдельно с использованием экспериментальной оценки.

Новый метод ***равновесного центрифугирования***, научное обоснование и практические рекомендации которого были детально изложены в главе 2, использовался в нашей работе в первую очередь для расширения диапазона исследуемых величин матричного потенциала (давления) почвенной влаги и равновесной влажности при оценке ОГХ почв легкого гранулометрического состава и их композиций с биополимерами. Кроме того, здесь отсутствовали какие либо пористые мембраны, отделяющие почву от удаляемой влаги, как в тензиометрических и капилляриметрических установках, способные приводить к кажущемуся увеличению водоудерживания в легких почвах при кольматации пор или недостаточных сдвиговых напряжениях влаги на первых этапах разрежений.

В качестве субстратов были исследованы кварцевый песок и полиминеральная пустынная песчаная почва Каракумов (ст. Репетек). В первом опыте исследовались композиции гидрогелей в дозах 0,03, 0,05, 0,1 и 0,2% с тонкозернистым кварцевым песком (рис.4.15). Часть материала была опубликована в качестве примеров в наших статьях, посвященных обоснованию метода равновесного центрифугирования и оценке влияния содержания органического вещества на ОГХ почв разного генезиса и дисперсности без детального обсуждения [Смагин, Садовникова и др., 98, 2004, 2009]. Поэтому ниже приводится подробное изложение проведенных экспериментов.

Исходные величины влагоемкости субстрата составили 28,9% (ПВ), 26,6% (КВ), 6,0% (НВ) и 3,5% (ММВ) при влаге завядания ВЗ=1,5%. Гель вносился в песок во влажном состоянии из расчета дозы воды, приливаемой для предварительного свободного набухания СПГ, адекватной полной влагоемкости для навески прибавляемого впоследствии

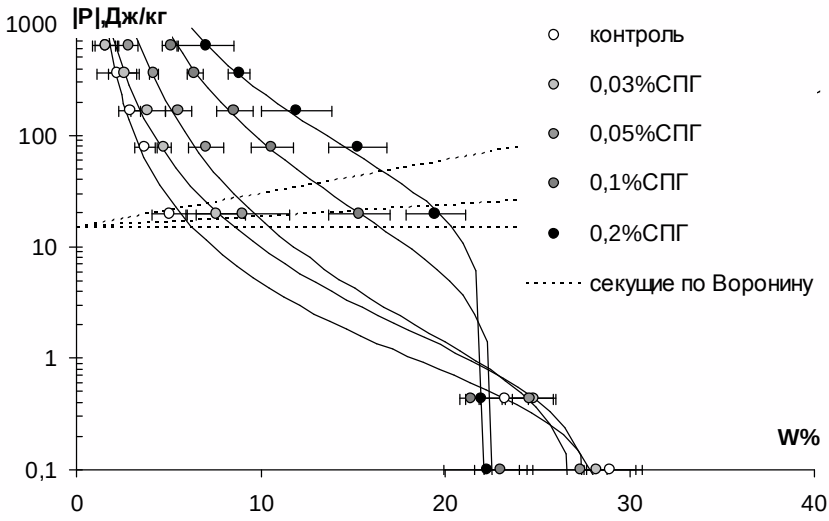


Рис. 4.15. ОГХ мономинерального кварцевого песка под воздействием СПГ (метод равновесного центрифугирования).

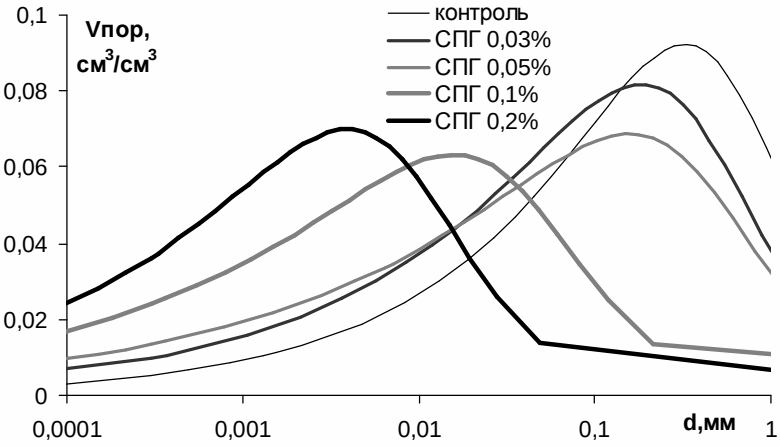


Рис. 4.16. Распределение пор мономинерального кварцевого песка под воздействием СПГ.

песчаного субстрата. После смешивания набухшего геля с песком композиции помещались в перфорированные центрифужные пробирки и оставлялись на 12 часов погруженными в дистиллированную воду для дальнейшего возможного набухания. Центрифугирование производилось с последовательным увеличением числа оборотов, начиная с тихоходных стадий 100-200 об/мин (0,3-1 Дж/кг или кПа матричного потенциала (давления)) до максимально возможных на центрифуге данного типа (5000-6000 об/мин или 440-640 Дж/кг). В результате эксперимента выяснилось что значения ПВ и КВ в композициях практически не менялись при внесении СПГ, оставаясь в диапазоне 23-38%, близком к исходному в песчаном субстрате. Наименьшая влагоемкость и ММВ, напротив, закономерно возрастали пропорционально дозе гидрогеля от значений 7-8% при 0,03% СПГ до 13-15% при 0,1% СПГ и 18-19% при 0,2% СПГ. То есть внесение 0,1-0,2% СПГ как и ранее повышало влагоемкость рыхлого песка в данном диапазоне до величин, свойственных супесям и легким суглинкам, согласно [Гаель, Смирнова, 99, Шеин, 2005].

Одновременно с ростом влагоемкости в области капиллярной и пленочной влаги и смещением ОГХ в сторону увеличения потенциалов, размер доминирующих в структуре пор последовательно уменьшался от 0,33мм в исходном песке до 0,015мм в композиции с 0,1% СПГ и до 0,0042мм при максимальной дозе 0,2% гидрогеля (рис. 4.16). На этом фоне величина ВЗ изменялась не столь сильно, оставаясь в диапазоне 3-5% при концентрациях СПГ 0,05-0,2%. То есть диапазон доступной влаги реально расширялся пропорционально дозе биополимера и приросту НВ от 4,5% в исходном субстрате до 11-16% при дозах 0,1-0,2% СПГ. Таким образом, впервые данный эксперимент показал доступность основной части пленочной и капиллярной влаги, аккумулированной СПГ, опровергнув полученные ранее ориентировочные оценки ВЗ и подтвердив положение о приемлемости для растений практически всей влаги набухания слабосшитых полимерных гидогелей, обоснованное в работах физико-химической школы проф. Казанского [Дубровский и др., 90, Лагутина и др., 95, Лагутина, 96].

Для окончательного суждения по данному вопросу был

Таблица 4.2 . Влага завядания овса в тонкозернистом кварцевом песке и его композициях с СПГ

Доза СПГ,%	ВЗ%
0 (контроль)	2,7±0,7
0,01	4,1±0,4
0,05	5,5±0,9
0,2	7,1±2,1

поставлен независимый эксперимент с определением ВЗ методом вегетационных миниатюр с проростками овса [Вадюнина, Корчагина, 86] (табл. 4.2). Как видно из результатов опыта, величина ВЗ закономерно возрастала по мере увеличения дозы СПГ, однако ее максимальные значения не превышали 7%, что с учетом доверительного интервала варьирования данного показателя было близко к оценке по ОГХ (5,2%). В последующей серии экспериментов, исследующих влияние биодеструкции СПГ на водоудерживающую способность с тем же субстратом, для дозы 0,2% было получено значение ВЗ по ОГХ равное 7,6%, то есть еще более близкое к экспериментальной оценке методом вегетационных миниатюр. На этом фоне рост НВ до 19-24% от дозы 0,2% приводит к формированию диапазона доступной влаги 11-16%, то есть 2-3 кратному возрастанию, относительно контроля. Таким образом, вопрос о доступности влаги в грубодисперсных субстратах с гидрогелем, возникший в предыдущем разделе при интерполяционной оценке ВЗ по ОГХ, полученным традиционными методами в узком диапазоне потенциалов, можно считать закрытым и констатировать, что основная часть влаги, запасаемая СПГ вполне приемлема для растений.

Возвращаясь к анализу ОГХ и производных от нее показателей для кварцевого песка с различным содержанием СПГ, отметим, что рост водоудерживающей способности пропорционально дозе СПГ хорошо отражался показателем интегральной энергии водоудерживания, составившим для ряда концентраций геля 0, 0,03, 0,05, 0,1 и 0,2% последовательность значений 6,8, 11,2, 13,0, 20,5 и 29,5 Дж/кг твердой фазы, соответственно. Характерной особенностью данного эксперимента явилось постоянство влагоемкости в области насыщения почвы влагой (ПВ и КВ) (рис.4.15). Очевидно, это

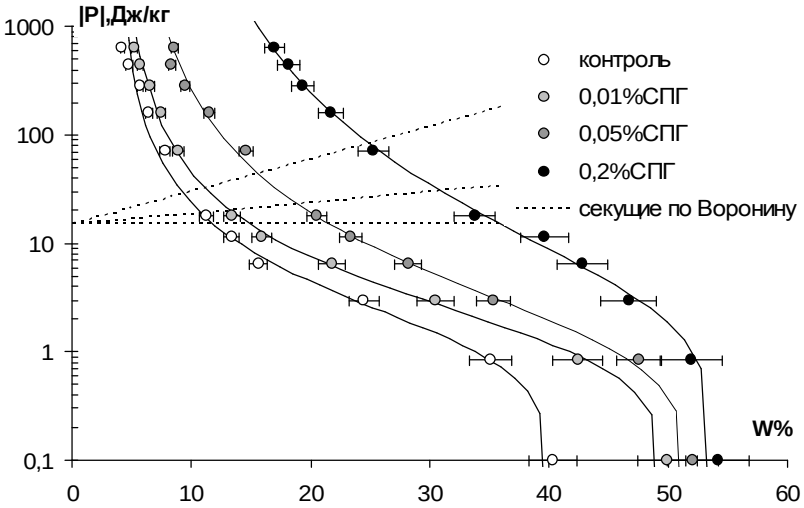


Рис. 4.17. ОГХ полиминерального Каракумского песка под воздействием СПГ (метод равновесного центрифугирования).

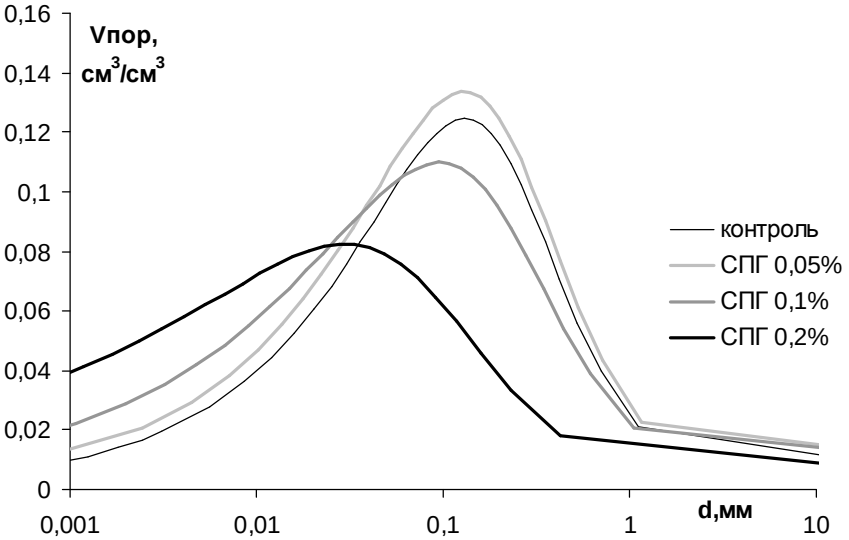


Рис. 4.18. Распределение пор полиминерального Каракумского песка под воздействием СПГ.

связано с условиями опыта и подготовки образцов. Как уже упоминалось выше, при смешивании СПГ с песком, масса

влажного геля соответствовала пористости (полной влагоемкости) субстрата – величине порядка 30%. После этого композиции размещались в центрифужных пробирках с перфорациями во дне для дальнейшего набухания (впитывания влаги). Однако, ограничение образца стенками пробирки оставляло лишь одну степень свободы для изменения его объема при набухании – рост вверх. В результате из-за давления вышележащих слоев и, вероятно, низкой влагопроводности композиций (см. сл. раздел), за срок 12 часов, отведенный на дополнительную подпитку влагой, особых изменений не происходило, и полная влагоемкость оставалась практически неизменной.

Этот факт представляет интерес с практической точки зрения, поскольку значительное увеличение ПВ (и КВ) в предшествующих опытах с капилляриметром при небольшой высоте образца и возможности почти свободного набухания, в реальных почвенных условиях может ограничиваться рядом факторов как статической (давление вышележащей толщи, жесткость упаковки грубодисперсных частиц), так и кинетической (скорость и интервалы подачи влаги при поливах (осадках)) природы. Отсюда следует вывод об эффективности внесения исходно набухшего геля с влагозапасом, превышающим таковой для расчетного слоя заделки СПГ (5-10см). в этом случае будет исходно сформирована более рыхлая структура с повышенной ПВ и КВ, которую в дальнейшем можно будет поддерживать регулярными поливами.

Сходные закономерности были получены на образцах полиминеральной песчаной почвы Каракумов, однако в отличие от предыдущего примера здесь композиции с СПГ имели возможность набухать свободно до помещения в центрифужные пробирки (рис. 4.17, 4.18). Поэтому полная и капиллярная влагоемкости в этих образцах закономерно возрастали при свободном набухании по мере увеличения дозы СПГ. Так на контроле ПВ составила 40%, а КВ (по точке перегиба ОГХ) – 26%. При дозе СПГ 0,1% эти величины возросли до 52 и 35%, а при дозе 0,2% до 54 и 39%, соответственно. Для этого эксперимента было характерно довольно плавное, пропорциональное увеличение водоудерживающей способности

во всем интервале исследуемых величин давлений (потенциалов) и содержания влаги под действием СПГ При двукратное увеличение дозы СПГ (от 0,1 до 0,2%) сопровождалось аналогичным приростом водоудерживания (рис. 4.17). Так изменения интегральной энергии водоудерживания в ряду концентраций СПГ 0, 0,05, 0,1, 0,2% характеризовался последовательностью: 9, 13,6, 20,6, 36,0 Дж/кг почвы. Величины НВ (по Воронину) возрастали от 11% на контроле до 19% при 0,1% концентрации СПГ и до 31% при 0,2% дозе. Аналогичный ряд ММВ составил последовательность 9,5, 16, 25%. Таким образом, доза СПГ всего 0,2% от массы почвы «переводила» Каракумский песок по водоудерживающей способности в суглинистую почву типа каштановой или коричневой, находящейся в соседних биоклиматических зонах. Отметим, что тензиометрический метод оценки ОГХ для тех же образцов показал сходные закономерности (рис. 4.12) при несколько различающихся абсолютных величинах влагоемкостей. Так в этом методе очень малые дозы СПГ (0,01-0,05%) уже давали значительный эффект, но на наш взгляд это может быть кажущееся увеличение в связи кольматацией гелем пор керамических фильтров, использующихся при отделении влаги от почвы. И наоборот максимальная доза (0,2%) в случае равновесного центрифугирования приводила к более высоким значениям влагоемкостей, по сравнению с тензиометрией (рис. 4.12, 4.18). Это может быть следствием как специфики методов отделения влаги, имеющих различия в определении потенциалов влаги (см., например, нашу статью [Смагин и др., 98]), так и разных условий усадки-набухания образцов (например, частичное уплотнение в поле центрифуги). Вместе с тем на наш взгляд, более объективным является метод центрифугирования с предварительной реализацией свободного набухания. В нем, как уже говорилось, отсутствуют какие либо мембраны для отделения воды от твердофазного матрикса, и связанные с ними артефакты.

Анализ распределения пор по размерам (рис. 4.18) выявил столь же сильные изменения в структурной организации песчаного субстрата под действием СПГ в дозе 0,2%. Максимум распределения смещается влево с величин порядка 0,13-0,15мм до 0,2-0,3мм. При этом более чем в два раза возрастает доля

микропор размером меньше 0,001 мм. При высыхании композиций с 0,2% содержанием СПГ образуются довольно прочные комки (агрегаты), что должно повышать стойкость подобных объектов к дефляции (ветровой эрозии). Дозы 0,05-0,1% не столь сильно меняют структуру песчаного субстрата, однако тренд смещения распределений пор в сторону меньших радиусов проявляется даже при таких небольших концентрациях (рис. 4.18).

До сих пор было исследовано влияние лишь одного вида СПГ – радиационносшитого полиакриламида, синтезированного в 90^{x} годах в ИХФ РАН [Казанский и др.,86]. Следующий пример касается сравнения воздействия разных типов (марок) современной товарной продукции СПГ на основе мономинерального кварцевого субстрата с использованием метода равновесного центрифугирования (рис. 4.19, 4.20). Помимо указанного выше СПГ в сравнительном анализе изучался западногерманский препарат «Аквасорб», активно позиционирующийся в последние годы на российских рынках в сфере цветоводства и озеленения, а также ***биотехнологическая продукция Уральского химического завода*** по разработкам ИТХ УрО РАН (марки ВУМ-ИТХ, ВУМ-Г (партия 85/1), ВУМ-ГМЦ (партия 85/2)). Продукция объединяет различные композиции акриловых сополимеров на основе акриламида и солей акриловой кислоты, наполненные отходами биокаталитического производства акриламида, а также солей гуминовых кислот в виде водной пасты. Акрилаты и гуматы позволяют ввести в структуру СПГ биофильные элементы в виде катионов соответствующих металлов. В качестве сшивающего агента используется метиленбисакриламид. Гидрогель ВУМ-ИТХ представляет собой базовый сополимер акриламида и акрилата аммония, наполненный (28%) твердыми отходами биокаталитического производства акриламида в виде смеси клеток микроорганизмов, клеточных агломератов и вспомогательного фильтрующего материала (фильтроперлит). Готовый гидрогель имеет водопоглощение 350 г/г при размере гранул от 1 до 5 мм. Образец ВУМ-Г (партия 85/1) включает кроме сополимера и наполнителя в виде отработанного биокатализатора производств акриламида (12%) гуматы в количестве 8% по сухому веществу и характеризуется

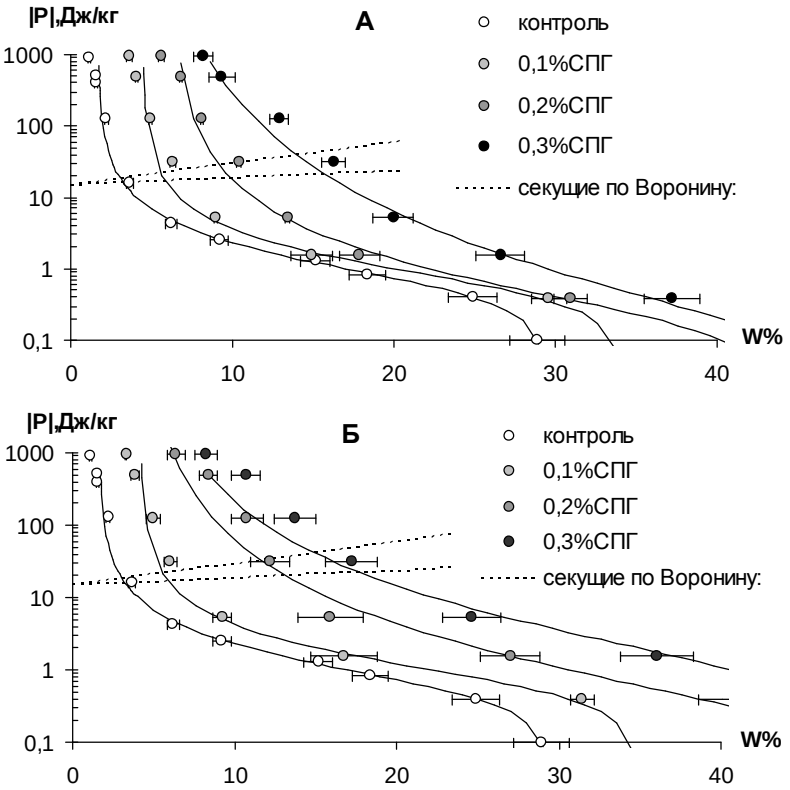


Рис. 4.19. ОГХ мономинерального кварцевого песка под воздействием различных СПГ: А- радиационносшитый полиакриламид (ИХФ РАН), Б – Аквасорб (Германия) (метод равновесного центрифугирования). **Аналитик – У.Д. Конгаржап**

водопоглощением до 370 г/г. Состав геля ВУМ-ГМЦ (партия 85/2)) аналогичен предыдущему (сополимер, отработанный биокатализатор, гуматы), но с добавками сульфатов магния магния и цинка по 0,35% в пересчете на металлы. Водопоглощение гидрогеля– 340 г/г.

Сравнительный анализ ОГХ песчаного субстрата под действием разных видов СПГ показал, что в целом все исследуемые образцы оказывают стабильное увеличение водоудерживающей способности пропорционально дозе

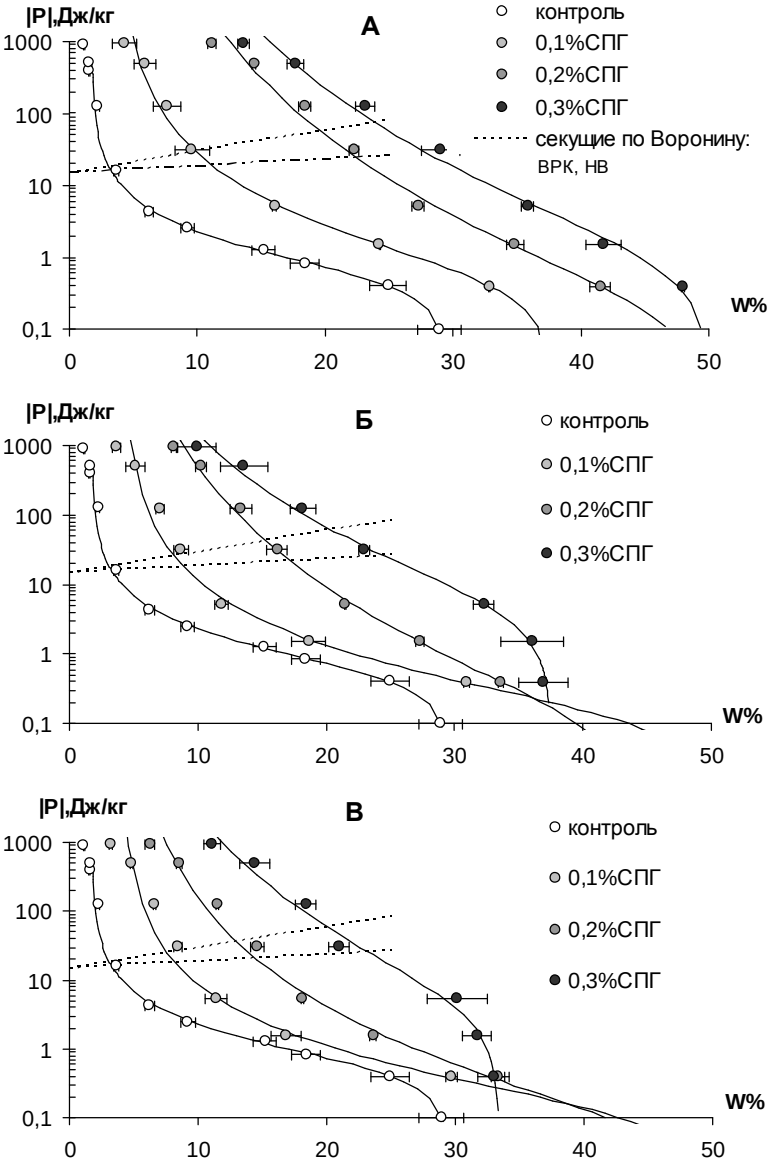


Рис. 4.20. ОГХ мономинерального кварцевого песка под воздействием различных СПГ ИТХ УрО РАН: А- ВУМ-ИТХ, Б – ВУМ-Г (партия 85/1), ВУМ-ГМЦ (партия 85/2) (метод равновесного центрифугирования). **Аналитик – У.Д. Конгаржап**

препарата в широком диапазоне абсолютных величин давлений (потенциалов) почвенной влаги от 0 до 1000 Дж/кг (рис. 4.19, 4.20). Наименьшая влагоемкость при дозах СПГ 0,2-0,3% от массы почвы достигала 15-20% и более, против 3-4% на контроле. То есть, как и в предыдущих случаях увеличение водоудерживания при таких дозах достигало 3-5 кратного размера и соответствовало переводу песчаного субстрата в суглинистый по данному показателю.

Наибольший эффект продемонстрировали образцы продукции Уральского химического завода, произведенной по технологиям ИТХ УрО РАН. По сравнению с радиационносшитым полиакриламидом и СПГ из Германии водоудерживание этих композиций в аналогичных концентрациях геля было стабильно выше в 1,3-1,8 раза в рабочем диапазоне матричных потенциалов от 10 до 1000 Дж/кг. Интересно, что при этом заявленные в паспортах препаратов степени набухания гелей Уральского химзавода (340-370 г/г) в 2-3 раза уступали таковым для их отечественного и зарубежного аналогов (600-1000 г/г). Как уже отмечалось, набухание в почвенных образцах будет отличаться от свободного и здесь могут действовать разные факторы (состав, реакция и ионная сила реального почвенного раствора, сопротивление со стороны порового пространства). В данном случае, поскольку субстратом был незасоленный мономинеральный песок, скорее всего главной причиной было ограничение набухания поровым пространством. Действительно, если рассчитать максимальную реализуемую в почве степень набухания геля как отношение полной влагоемкости (W_s) к концентрации (дозе) СПГ, легко убедиться, что при средних величинах W_s порядка 40-50% и дозах СПГ 0,2-0,3% искомый показатель не превысит 200-250 г/г. Даже для малой дозы СПГ в 0,1% максимальная степень набухания при типичных величинах W_s=40% составит лишь 400 г/г. То есть «паспортный» ресурс сильнонабухающих гелей с водопоглощением до 1000г/г в реальных почвенно-физических системах просто не может реализоваться. С одной стороны низкая пористость и весьма жесткая структура грубодисперсных почв ограничивают набухание, а с другой – слабое давление набухания СПГ в диапазоне водопоглощения 500-1000 г/г, не

способное противостоять весу почвенного слоя и структурному (обжимающему) давлению [Лагутина и др., 95, 96]. Полученный результат позволяет сделать важный с технологической точки зрения вывод о нецелесообразности увеличения водопоглощения СПГ, применяемых с целью почвенного конструирования, до гипервысоких значений порядка 700-1000 г/г. Напротив, более эффективными будут гели с наполнителями (более прочной структурой), развивающие относительно невысокую 300-400 г/г степень свободного набухания, но устойчивые при этом к воздействию разнообразных почвенных факторов от солевого (осмотического) и ПАВ-стресса, до структурного давления и микробной деструкции. В этом отношении биотехнологическая продукция Уральского химзавода с наполнителями полимерной матрицы в виде биокаталитических отходов, гуматов и солей разнообразных металлов представляет особый интерес. Она продемонстрировала наилучшие результаты по водоудерживанию, а наличие в ее составе макро- и микроэлементов (N, K, Zn) позволяет рассчитывать на дополнительную агрохимическую стимуляцию продуктивности. Гуматы также могут стимулировант корневое потребление растений и сдерживать микробную деструкцию гелей. При этом включение ионных групп электролитов или солей в виде гуматов внутрь структуры полимера, по-видимому, решает проблему снижения набухания СПГ под действием осмотического стресса или снижения ПАВ-барьера амфифильными органическими веществами почвы. Действительно, сравнивая данные по водоудерживанию на рис. 4.13 и 4.20, можно убедиться, что чистый гидрофильный СПГ в почве с гумусовыми веществами (торф) резко снижает набухание, тогда как введение гуматов в качестве наполнителя полимерной сетки лишь незначительно уменьшает водоудерживающую способность (ВУМ-ИТХ – без гуматов и ВУМ-Г, ВУМ-ГМЦ – с гуматами на рис. 4.20). По сути предложенная коллегами из ИТХ УрО РАН технология производства СПГ позволяет вводить в них различные вещества, включая стимуляторы и ингибиторы биологической активности, и регулировать тем самым сложный комплекс биофизических процессов, присущий почве.

Наряду с синтетическими органическими веществами, представленными в данной работе СПГ, методом равновесного центрифугирования были проведены исследования водоудерживания под действием ***природных органогенных материалов*** и продуктов на их основе (рис. 4.21-4.25). В реальных условиях биогенная организация на почвах легкого гранулометрического состава часто приводит на первых этапах к аккумуляции мощных запасов подстилки (детрита) поверх песчаного субстрата, что весьма положительно отражается на водоудерживании получаемой слоистой «конструкции». По-видимому, высокая влагоемкость детрита, наряду с хорошей водопроницаемостью и аэрацией позволяет аккумулировать в верхней корнеобитаемой толще необходимые запасы влаги и питательных веществ, не нарушая при этом общий аэробный режим автоморфных лесных ландшафтов. Для проверки этого положения обратимся к анализу данных по ОГХ различных генетических горизонтов песчаных дерново-подзолистых почв сосняков простых овсяницево-зеленомошных (о-в. Лохин, Подмосковье). На рисунке 4.21 (верхняя часть) приведены ОГХ минеральных образцов и подстилки, из которых следует, что детрит обладает на порядок более высокой весовой влагоемкостью по сравнению с песчаным материалом. Действительно, полная влагоемкость у подстилки превышает 300 весовых % (3 г/г) против 27-33% в горизонтах A1E, B и C. Наименьшая влагоемкость (НВ), определенная способом секущих по Воронину (1986) для песчаных слоев варьировала от 4 до 8%, а у подстилки достигала 70-80%.

При сравнительном анализе следует учесть, что весовые влажности, отнесенные к массе почвы, часто не дают адекватные представления о реальном количестве удерживаемых почвенными слоями влаги, особенно при сильных различиях в плотностях сложения генетических горизонтов. Переход от весовых величин влажности к объемным легко осуществить посредством умножения на плотность почвы: $\Theta=W\rho_b$. Полученные ОГХ в координатах «давление-объемная влажность» приведены в нижней половине рисунка 4.21. Как видно различия в водоудерживающей способности сравниваемых горизонтов стали менее контрастными, однако ОГХ детрита и в этом случае оставалась

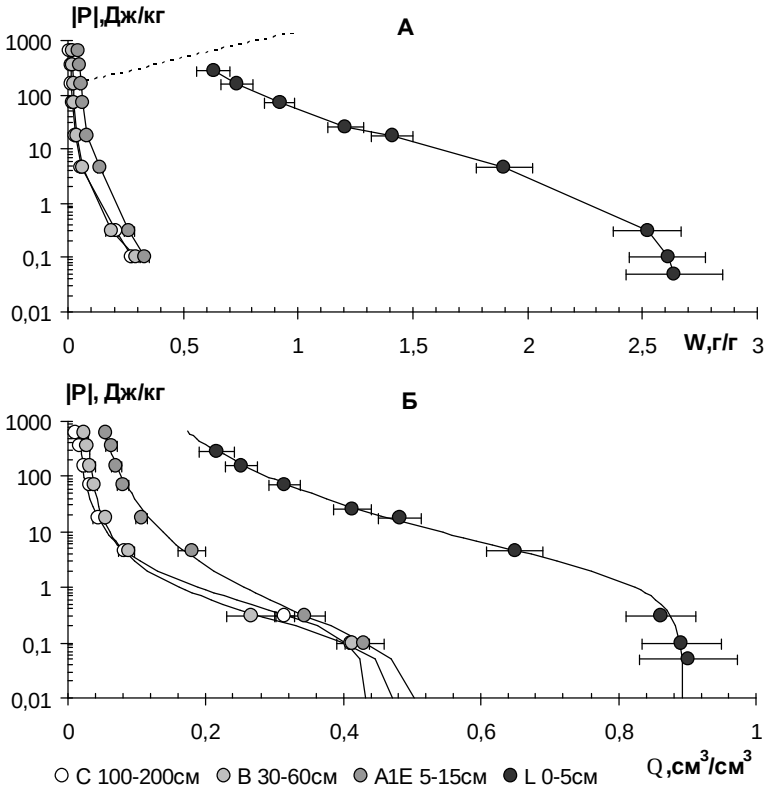


Рис.4.21. ОГХ исследуемых образцов генетических горизонтов дерново-подзолистой почвы: А-весовые единицы влажности, Б – объемные единицы влажности; гладкие кривые – аппроксимация данных функцией ван-Генухтена (2.2); пунктирная линия – секущая для определения НВ по Воронину.

смещенной вправо относительно линий минеральных горизонтов, что свидетельствовало о более высокой водоудерживающей способности органического материала во всем диапазоне потенциального содержания почвенной влаги. Влажность насыщения (полная влагоемкость) детрита в объемных единицах достигала 85-90% против 40-48% в минеральных горизонтах, КВ (по точке перегиба) –70% против

25-30%, а НВ, оцененная предложенным нами методом по высоте капиллярного поднятия [Смагин, 2003, Смагин и др., 2009] у детрита была не менее 60-65% при 10-15% в минеральных горизонтах.

Вместе с тем априори понятно, что высокая влагоемкость одного весьма небольшого слоя еще не означает оптимизации водного режима почвенной толщи в целом, поскольку вертикальные градиенты капиллярно-сорбционного давления, присущие подобным структурам, могут быстро нивелировать повышенное водоудерживание единичного горизонта в процессе массопереноса влаги. Для получения ясной картины необходимо исследовать перераспределение влаги осадков той или иной интенсивности в вариантах почвы с подстилкой и без нее на фоне гравитационного оттока и корневого потребления влаги растениями с определенным транспирационным расходом, что будет сделано позже (см. главу 5) с использованием метода компьютерного моделирования. Задача данного раздела – получить и проанализировать экспериментальный материал, необходимый и достаточный для информационного обеспечения компьютерного моделирования слоистых почвенных конструкций.

Продолжая анализ, рассмотрим влияние ***торфа и почвенных материалов на его основе*** на водоудерживающую способность песчаных субстратов. Как уже отмечалось в предыдущих главах, торф и торфосмеси прочно заняли лидирующее положение в качестве растительного грунта при проведении озеленительных работ. Это связано не только и не столько с хорошими агрохимическими показателями данной субстанции, но в первую очередь – с ее высокой водоудерживающей способностью и обеспечением прорастающих семян необходимой влагой. На рисунках 4.22-4.24 представлены ОГХ различных органогенных материалов и их композиций с минеральными субстратами, иллюстрирующие данное положение. Как видно полная и капиллярная влагоемкости собственно органогенных материалов варьируют от 200-300 до 500-600%, что на порядок выше аналогичных характеристик в минеральных песчаных субстратах. При этом механообработка (диспергирование) торфа в меньшей степени влияет на его влагоемкость, по сравнению с исходными

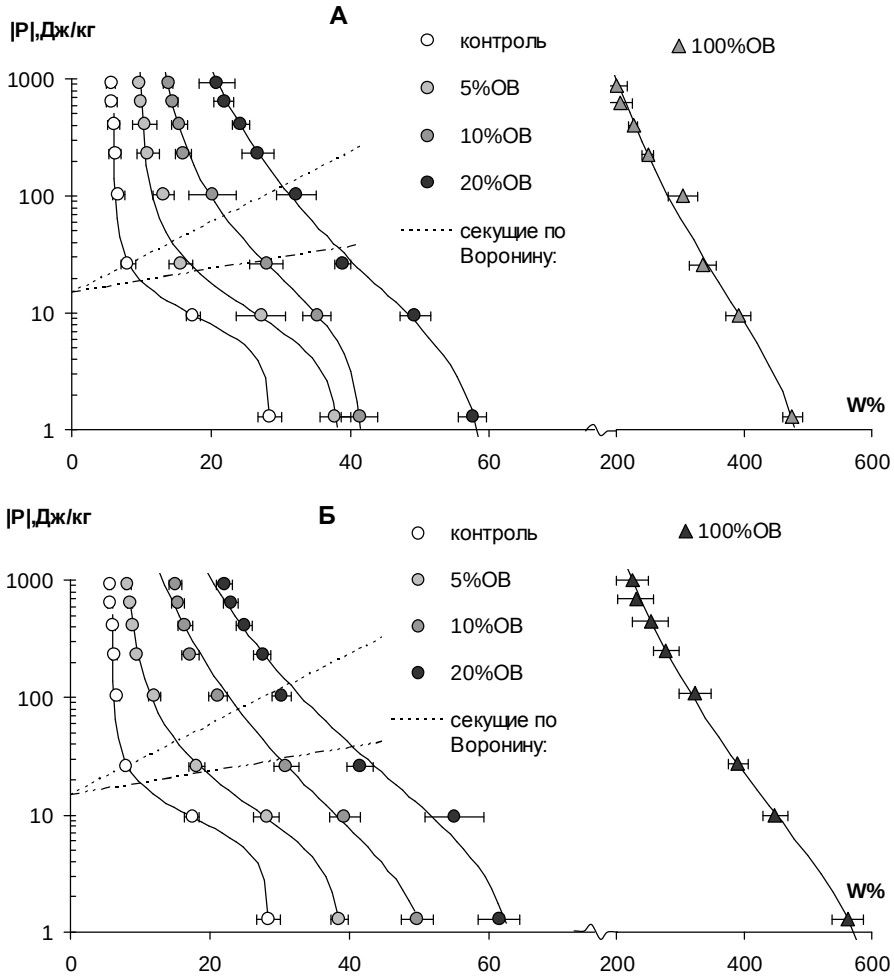


Рис. 4.22. Влияние торфяного почвомодификатора (ОВ) разной дисперсности на ОГХ аридной песчаной почвы Бахрейна. А – природный торфяной материал (Тверь), Б – после диспергации до размера частиц торфа порядка 1мм. **Аналитик – А.В. Арзамазова.**

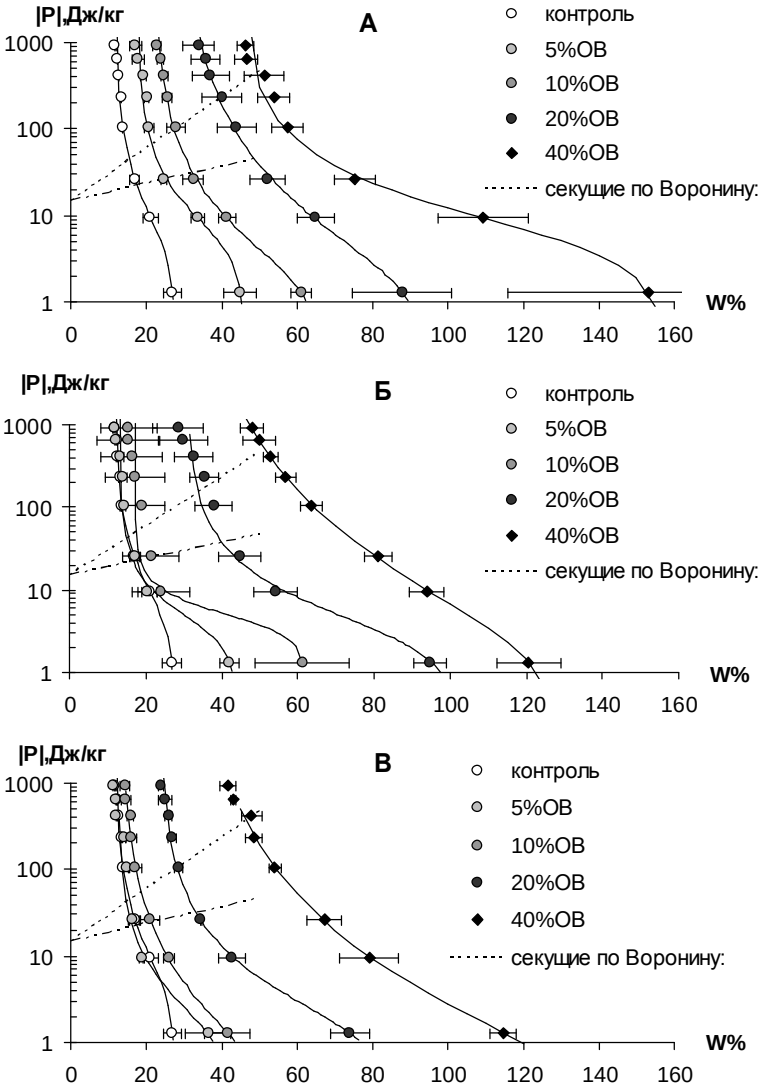


Рис. 4.23. Влияние органогенных почвомодификаторов разной дисперсности на ОГХ пылевато-песчаной аридной почвы Катара. А – природный торфяный материал (Калуга), Б – после диспергации до размера частиц порядка 1мм, В – торфо-сапропелевый почвомодификатор (Калуга).

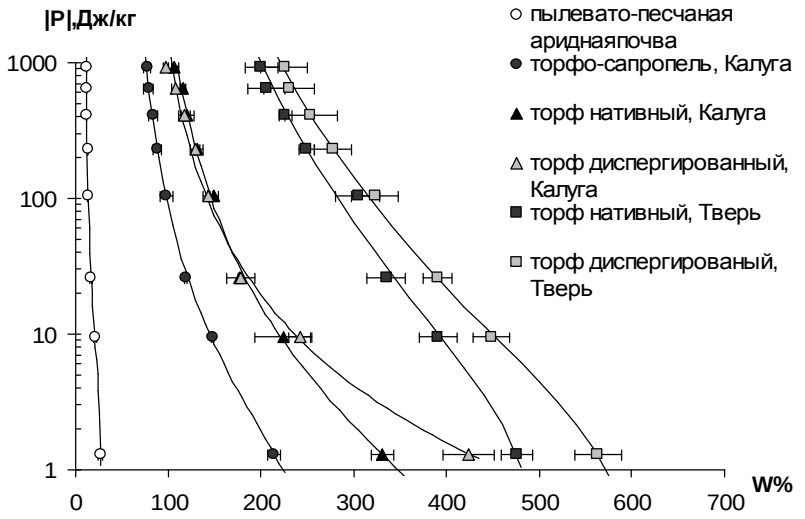


Рис. 4.24. Сравнительный анализ влияния генезиса и механообработки органогенных почвомодификаторов на их водоудерживающие качества. **Аналитик – А.В. Арзамазова.**

различиями в качестве, обусловленными генезисом. Так диспергация торфяных образцов Тверского месторождения увеличила их водоудерживающую способность максимум в 1,2 раза, а для калужского торфа в основном диапазоне влажности вообще не привела к каким либо значимым изменениям (рис. 4.24). Тогда как исходные различия влагоемкостей между исследуемыми образцами двух месторождений достигали 1,6-2,3 раза в пользу тверского торфа. По-видимому, данный вывод должен быть взят на вооружение при оценках перспективности и экономической целесообразности использования тех или иных видов торфа в почвенном конструировании. Затраты на механическую обработку не дадут такого эффекта, как возможный подбор месторождения с соответствующим качеством торфяного материала. Вместе с тем при окончательном суждении необходимо наряду с весовой влагоемкостью учитывать плотность торфа, по аналогии с

обсуждаемым выше примером в виде детрита подстилки (рис. 4.21). Так рыхлые, плохо разложившиеся верхние горизонты сфагновых торфов (очес), обладая высокой гигроскопичностью, демонстрируют величины водовместимости более 800-1000% на массу сухого вещества. Однако плотность таких образований редко превышает 0,05г/см^3. Поэтому их объемная влагоемкость характеризуется максимальными значениями всего 40-50%.

Анализ свойств торфопесчаных композиций показывает, что относительно малые дозы (5-10%) органического вещества в большинстве случаев оказывают значительное (в 1,5-2 раза) увеличение водоудерживающей способности песчаных субстратов во всем диапазоне варьирования показателей ОГХ (рис. 4.22, 4.23-А). Однако в некоторых экспериментах (рис. 4.23-Б,В) такие дозы оказывались неэффективными и водоудерживание композиций оставалось близким к таковому в исходном минеральном субстрате. Если обратить внимание на качество самих органических материалов, «неудачные» варианты относились к диспергированным или органоминеральным торфосапропелевым образцам. Резонно предположить, что при малых дозах, тонкоизмельченные частицы гидрофобного органического вещества, попадая в поровое пространство минеральных частиц, будучи разобщенными друг от друга, могут не успевать набухнуть из-за плохого смачивания и блокирования поступления влаги в поры. Тогда как не измельченный торф или композиции при больших дозах органического вещества постепенно вбирают и проводят воду по собственным тканям или совокупности гидравлически связанных друг с другом органических частиц, что позволяет им реализовать максимальное набухание. Этот результат также свидетельствует в пользу применения более простых технологических приемов без механической обработки торфа и (или) закладки его в почву сплошным слоем без перемешивания. О преимуществе слоистой конструкции по сравнению с перемешиванием будет сказано ниже в связи с оценкой влагопроводности почвенных конструкций.

Высокие дозы торфяных и торфосапропелевых почвомодификаторов (от 20% и более) стабильно, во всем диапазоне ОГХ «сдвигают» водоудерживающую способность песков на уровень суглинков и глин (рис. 4.22-4.23), однако их

вряд ли можно считать рентабельными с экономической точки зрения. Так близкие результаты можно получить при применении СПГ в дозе всего 0,2-0,3%. То есть эффективность от СПГ будет практически в 100 раз выше по действию на единицу массы препарата. И это без учета логистики (затрат на транспортировку, размещение, хранение почвомодификаторов). По-видимому, использование природных органических веществ для кондиционирования и конструирования почв, столь распространенное в современном ландскейпинге, со временем уступит место более экономичному способу на основе синтетических почвомодификаторов. В любом случае, при оценке рентабельности тех или иных почвенных кондиционеров необходимы комплексные исследования не только их влияния на водоудерживающую способность и иные технологические свойства, но и изучение обратных воздействий на органические материалы со стороны различных фаз и компонентов почв, включая биологические.

В завершении раздела коснемся вкратце темы ***математического моделирования*** влияния содержания органических кондиционеров на ОГХ почв легкого гранулометрического состава. ОГХ грубодисперсных почв и их композиций почвомодификаторами хорошо описываются ***функцией ван-Генухтена*** (2.2) с коэффициентами нелинейной регрессии $R^2 \approx 0{,}98\text{-}0{,}99$, статистически значимыми параметрами регрессии ψ_e и m (n) и небольшими среднеквадратическими ошибками, не превышающими доверительные интервалы варьирования исследуемых зависимостей $\psi_m(W)$, как следует из статистических отчетов программы S-Plot, использующейся для поиска параметров модели ОГХ ван-Генухтена по экспериментальным данным. Визуально это положение подтверждается многочисленными графиками ОГХ (рис. 4.1, 4.3, 4.5, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24), полученными в данном исследовании, где собственно кривые являются результатами подобной аппроксимации функцией ван-Генухтена экспериментальных значений в виде отдельных точек (символов) на графиках ОГХ. Анализ параметров функции ван-Генухтена показывает, что значения потенциала входа воздуха в почвенную физическую систему ψ_e варьируют от 0,6 до 6

Дж/кг, а в отдельных случаях достигают 7-12 Дж/кг, обычно увеличиваясь по мере роста дисперсности (от песков к супесям и торфам) и содержания (доз) биополимеров в композициях. Заметим, что для одних и тех же образцов показатели ψ_e в случае метода равновесного центрифугирования были чаще всего ниже, чем при капилляриметрии и тензиометрии. Это, вероятнее всего, объясняется дополнительным сопротивлением току влаги при дренировании образцов со стороны тонкопористых мембран-фильтров, являющихся обязательным элементом капилляриметров и тензиометрических установок. Теоретически надо на первых этапах разрежений для грубодисперсных сред использовать крупнопористые мембраны, размер пор в которых соизмерим с таковым в самих образцах. Однако, на практике это условие не соблюдается и весь анализ проводится с использованием одного фильтра-мембраны, чьи поры выдерживают разрежения до 80-90 кПа, оставаясь заполненными влагой. Поэтому метод равновесного центрифугирования, на наш взгляд, предпочтительнее для анализа ОГХ грубодисперсных почвенных объектов, так как никаких мембран в нем не требуется.

Второй параметр модели ван-Генухтена m, отражающий крутизну ОГХ, варьировал меньше, как это и должно быть для показателя степенной функции, и чаще всего не выходил за пределы диапазона 0,2-0,7. Связанный с ним уравнением $m=1-1/n$ показатель n, соответственно, варьировал, как правило, в пределах значений 1,3-3, характерных для грубодисперсных почв, согласно международным базам данных UNSODA и HYPRES [Теории и методы.., 2007]. Какой либо строгой зависимости этих показателей от дисперсности и дозы почвомодификаторов, равно как и от методов получения ОГХ выявлено не было.

В нашей предшествующей работе [Смагин, Садовникова, 2009] была предложена модель для оценки ОГХ в зависимости от дозы почвомодификатора (на примере СПГ), основанная на фундаментальном принципе аддитивности термодинамических потенциалов. В модели полный потенциал влаги был представлен в виде суммы двух составляющих – матричного потенциала минерального субстрата (почвы), описанного функцией ван-Генухтена, и «осмотической» компоненты в виде

потенциала набухания биополимера как функции от дисперсности (удельной поверхности) и степени набухания, выраженной соотношением (W/C), где W – влажность, C – концентрация (доза) почвомодификатора. Как показал анализ, модель вполне адекватно воспроизводила реальные ОГХ композиций с гидрогелями в пределах допустимых погрешностей и позволяла оценивать вклад той или иной дозы полимера в увеличение водоудерживающей способности. Вместе с тем, поскольку современные компьютерные среды для моделирования энергомассопереноса в почвах оперируют собственно функциями ван-Генухтена и подобными им эмпирическими зависимостями и не предполагают их замену со стороны пользователя какими либо другими уравнениями, использовать нашу разработку для технологического моделирования почвенных конструкций пока не представляется возможным. Поэтому в данном исследовании изучение ОГХ композиций с почвомодификаторами имело конечной целью технологическое моделирование для обоснования оптимальных параметров почвенных конструкций, мы не будем детально останавливаться на попытках количественного описания водоудерживания как функции от дозы почвомодификатора, отсылая заинтересованных читателей к предшествующей работе [Смагин, Садовникова, 2009]. В настоящей работе был избран самый простой путь – получение экспериментальной информации по ОГХ конкретных почв и композиций с кондиционерами авторским методом равновесного центрифугирования с последующей аппроксимацией данных стандартной функцией ван-Генухтена для ввода в компьютерную модель транспорта и поглощения влаги (см. главу.5). Вместе с тем задача разработки фундаментальных (не эмпирических) моделей ОГХ остается на наш взгляд одной из наиболее важных в гидрофизике, тем более что имеются основания ее решения на базе теории электрических (поверхностных) взаимодействий отдельных фаз и компонентов почвенной физической системы [Смагин, 2011]. В будущих компьютерных моделях энергомассопереноса, по-видимому, можно будет использовать широкий арсенал функций ОГХ и влагопроводности, включая вновь разработанные зависимости, что позволит улучшить прогноз водного режима и сопряженных

с ним динамических функциональных характеристик почв и грунтов.

4.2. Влияние синтетических и природных почвомодификаторов на влагопроводящие свойства почв и грунтов.

Функция влагопроводности (ФВ), наряду с ОГХ является базовым показателем в современной термодинамической концепции физического состояния почв, поскольку она используется в моделях массопереноса влаги и при оценке подвижности влаги в том или ином диапазоне ее содержания п почвах [Судницын, 79, 95, Воронин, 86, Глобус, 87, Шеин, 2005]. Для почв легкого гранулометрического состава характерно резкое уменьшение гидравлической проводимости по мере иссушения по причине малого количества тонких влагопроводящих пор в структуре их порового пространства (рис. 4.2). В результате при поливах после инфильтрации со скоростями продвижения фронта влаги в несколько м/сут и быстрого оттока гравитационной влаги в грубодисперсных почвах движение оставшейся пленочной и капиллярно-менисковой (стыковой) влаги происходит крайне медленно [Гаель, Смирнова, 99]. С одной стороны это гарантирует резкое сокращение испарения из почвы при подсыхании верхних горизонтов, но с другой – невозможность подтока влаги к корням растений с необходимой для обеспечения транспирации и биопродуктивности интенсивностью [Судницын, 79, 95].

Внесение биополимеров, как обсуждалось выше (§ 4.1) в большинстве случаев способствует формированию дополнительной сети тонких макропор и мезопор, что хорошо видно на соответствующих графиках распределения пор по размерам (рис. 4.2-4.18). Отсюда следует, что почвы, кондиционированные биополимерами, должны обладать повышенной гидравлической проводимостью в области капиллярной и пленочной влаги по сравнению с контролем. Это положение было проверено экспериментально с использованием двух вариантов оценки ФВ в нестационарном режиме – зондового тензиометрического метода с расчетом по модели Гарднера [Вадюнина, Корчагина, 86, Теории и методы…, 2007]

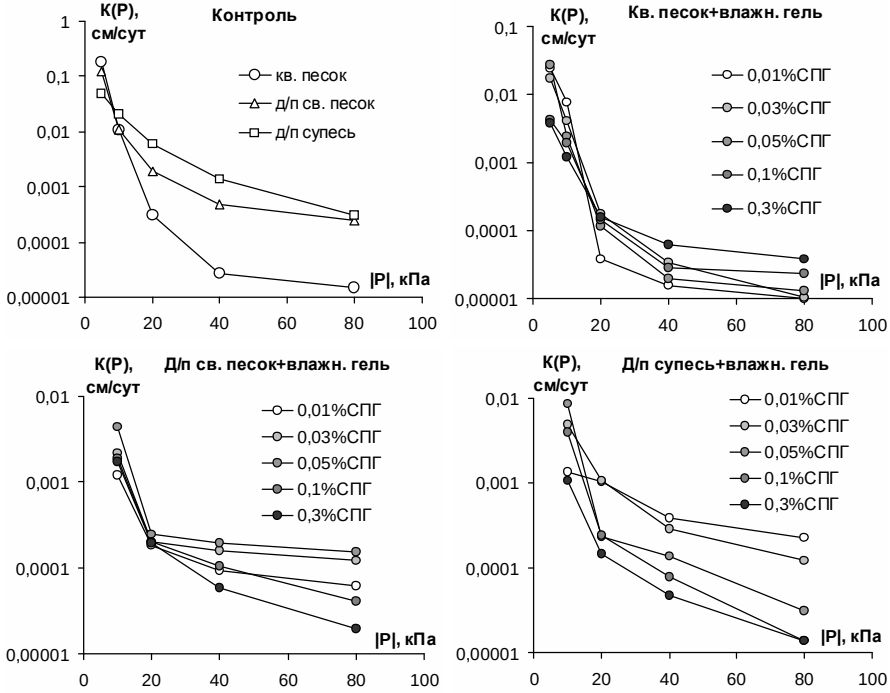


Рис. 4.25. Влияние СПГ на функцию влагопроводности кварцевого песка и дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава (зондовый тензиометрический метод).

и метода равновесного центрифугирования с предложенной нами кинетической моделью удаления влаги из почвы под действием центробежной силы [Смагин, Садовникова и др., 98, 99].

Рассмотрим полученные результаты, часть из которых была опубликована ранее в работах [Смагин, Садовникова, 94, 2009]. Начнем с тензиометрического определения ФВ в относительно узком диапазоне абсолютных величин давления почвенной влаги 0-80 кПа. Эксперимент проводился с тремя видами почвенных образцов – мономинеральным кварцевым песком, связнопесчаной дерново-подзолистой почвой и супесчаной окультуренной дерново-подзолистой почвой Серебряноборского опытного лесничества ин-та Лесоведения

РАН (Московская обл.). Отметим, что использованная при расчете ФВ модель Гарднера удовлетворительно описывала движение влаги на начальных этапах дренирования, о чем свидетельствовали достаточно строгие линейные зависимости (R^2 = 0,87-0,99) величин, обратных потоку влаги из образца от логарифма времени. Вместе с тем получаемые данным методом функции влагопроводности могут быть занижены, поскольку в расчетах не учитывалось сопротивление движению влаги со стороны тонкопористого мембранного фильтра [Теории и методы…, 2007].

Результаты экспериментов представлены на рисунке 4.25. Из его анализа следует, что присутствие геля не однозначно сказывается на проводимости образцов различного гранулометрического состава. В грубодисперсном несвязном кварцевом песке по мере увеличения концентрации СПГ происходит некоторое снижение коэффициента влагопроводности в диапазоне высоких влажностей. Это, по-видимому, связано с увеличением вязкости раствора и кольматированием дренирующих пор набухшим гелем. Однако при дальнейшем иссушении образца (разрежения – 40-80 кПа) значения проводимости начинают, как и ожидалось, увеличиваться пропорционально дозе полимера. То есть частички гелей, локализуясь в песке, формируют добавочную сеть тонких влагопроводящих путей на фоне не работающих в данном диапазоне давлений крупных пор грубодисперсного субстрата. При этом указанный характер ФВ принципиально не меняется от способа внесения СПГ в образец (сухой порошок или предварительно набухший гель).

Для супесчаной почвы отмечается уменьшение функции влагопроводности во всем диапазоне потенциалов почвенной влаги по мере увеличения содержания СПГ. В отличие от несвязного песка в супеси достаточно тонких влагопроводящих капилляров, о чем свидетельствует существенно большая исходная проводимость этой почвы при абсолютных давлениях 20-80 кПа (рис. 4.25). Поэтому присутствие СПГ однозначно увеличивает сопротивление току воды, как по крупным, так и по тонким влагопроводящим путям.

Связный песок занимает промежуточное положение в рассматриваемом ряду образцов по исходной проводимости и

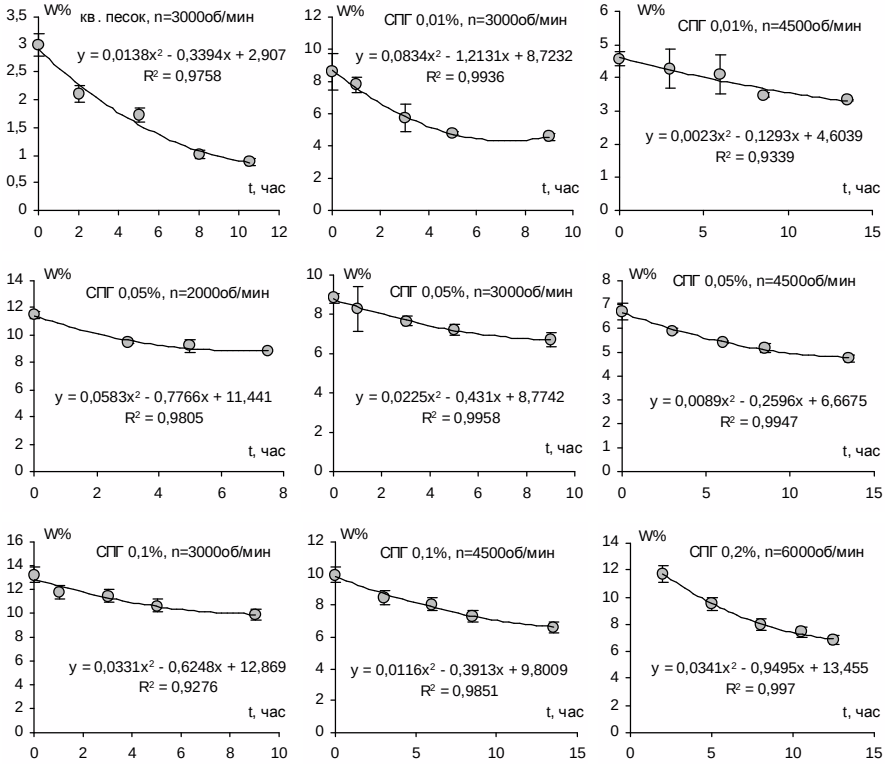


Рис. 4.26. Кинетические кривые удаления влаги их почвы в центробежном поле и их описание моделью (2.26).

по влиянию на нее СПГ. Большие дозы биополимеров в области высоких разрежений снижают коэффициент влагопроводности, а малые – несколько увеличивают (рис. 4.25).

Рассматриваемые закономерности нуждаются в дополнительной экспериментальной проверке в более широком диапазоне потенциалов (давлений) почвенной влаги и последующей формализации для включения в модели движения влаги и растворенных веществ. Поэтому в другой серии экспериментов ФВ определялась альтернативным методом равновесного центрифугирования [Смагин, Садовникова и др., 98, 99]. Преимущество данного метода, как уже упоминалось, состоит не только в значительном (до 10 раз) расширении диапазона давлений почвенной влаги, в пределах которого

осуществляется определение ФВ, но и в отсутствие необходимости отделять воду от почвы через тонкопористые фильтры с добавочным гидравлическим сопротивлением току влаги. На рисунке 4.26 приведены выборочные результаты по кинетике центрифугирования исследованных образцов, подтверждающие адекватность предложенной модели (2.24-2.26) для описания процесса удаления влаги под действием центробежной силы.

По кинетическим константам и параметрам равновесной влажности с учетом уравнений (2.28, 2.30) были рассчитаны значения гидравлической проводимости в зависимости от давления почвенной влаги для кварцевого песка и его композиций с СПГ. Графики зависимости и ее аппроксимация степенной моделью Кэмпбелла [Campbell, 85] приведены на рисунке 4.27. По аналогии с предыдущими результатами, но в существенно большем диапазоне исследуемой зависимости, показано, что СПГ снижает влагопроводность, пропорционально дозе в области близкой к насыщению (фильтрации) и увеличивает при высоких абсолютных значениях давления почвенной влаги. При этом для доз СПГ 0,1-0,2% снижение ФВ в области гравитационной влаги происходит практически на порядок, а прибавка в диапазоне капиллярной и пленочной влаги (|P|=400-700кПа) достигает 4-5 кратного значения и выше. Причины таких изменений уже обсуждались ранее и сводятся с одной стороны к снижению подвижности влаги и к росту ее вязкости при взаимодействии с СПГ в состоянии обводненности почвы, а с другой – с формированием дополнительной сети мезопор и тонких капилляров благодаря расположению частичек геля в поровом пространстве грубодисперсного материала, обеспечивающих прибавку ФВ при сильных перепадах давления. Степенная функция Кэмпбелла, удобная для использования в моделях массопереноса влаги, весьма хорошо аппроксимирует реальные данные во всем диапазоне их варьирования с коэффициентами регресси R^2=0,98-0,99 и параметрами аппроксимации постепенно понижающими свои значения по мере роста дозы биополимеров (рис.4.27).

Интересен тот факт, что при сопоставлении влагопроводности кварцевого песка и его композиций с гелем,

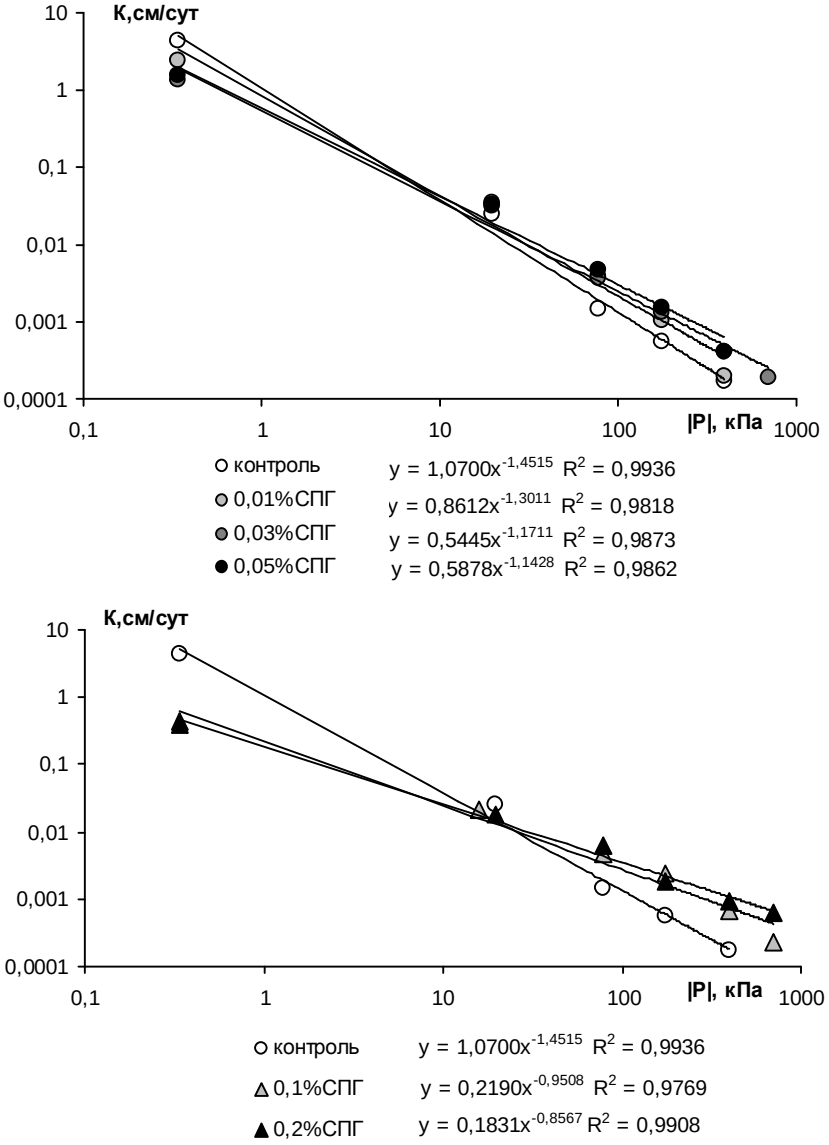


Рис. 4.27. Функции влагопроводности мономинерального кварцевого песка под воздействием СПГ (метод равновесного центрифугирования) и их аппроксимация моделью Кэмпбелла.

оцениваемой разными методами, оказалось, что метод равновесного центрифугирования дает более высокие величины ФВ в области пленочной и капиллярной влаги (за пределами НВ). Одна из возможных причин таких расхождений – сопротивление влагопреносу со стороны тонкопористой мембраны-фильтра в тензиометрической установке. По данным [Гаель, Смирнова, 99] в песках степной и пустынной зон от 6-20 до 30-100 мм/год осадков поступает в грунтовые воды в виде так называемого пленочного стока при влажностях ниже НВ. Минимальная из этого диапазона величина в пересчете на сутки дает интенсивность движения почвенной влаги $1{,}6 \cdot 10^{-3}$ см/сут, что соизмеримо с оценкой ФВ методом равновесного центрифугирования в соответствующем диапазоне разрежений (70-400 кПа), дающей интервал ФВ $1{,}5 \cdot 10^{-3} – 1{,}7 \cdot 10^{-4}$ см/сут и на два порядка превышает таковую величину в случае тензиометрии (1,5-2,7·10^{-5} см/сут при |P|=40-80кПа). Заметим, что пленочный сток предполагает медленное гравитационное перемещение влаги вниз под действием силы тяжести со скоростью равной ФВ, поскольку градиент капиллярно-сорбционного давления в почве равномерно иссушенной до величин ММВ (ВРК) практически равен нулю. Указанные факты дают основания считать метод равновесного центрифугирования и соответствующую модель кинетики дренирования образцов [Смагин, Садовникова и др., 98] более приемлемыми для оценки ФВ грубодисперсных почв в нестационарном режиме по сравнению с тензиометрией и моделью Гарднера [Вадюнина, Корчагина, 86].

В большинстве современных компьютерных моделей энергомассопереноса ФВ оценивается по данным о максимальной скорости перемещения влаги в пористой среде (коэффициенте фильтрации) и ОГХ с использованием того или иного теоретического уравнения влагопроводности, например, функции Муалема (2.4) (см. гл.2). Насколько этот способ расчета адекватен реальности для грубодисперсных почвенных объектов показывает иллюстрация 4.28. Как видно, и для контрольного образца (кварцевый песок) и для его композиции с гидрогелем лишь в области близкой к насыщению (0-1 кПа абсолютных значений давления почвенной влаги) наблюдается полное соответствие расчетных и экспериментальных величин.

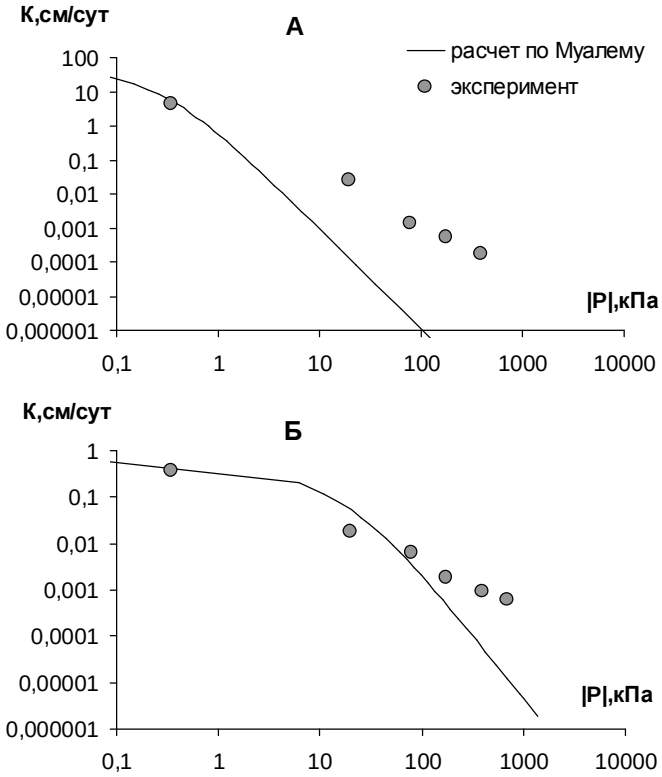


Рис. 4.28. Сопоставление функции Муалема (расчет из ОГХ) и экспериментальных данных по ненасыщенной гидравлической проводимости: А – контроль (кварцевый песок), Б – 0,2% СПГ

При дальнейшем иссушении почвы, расчет по Муалему дает резкий спад функции влагопроводности в песке, причем различия с экспериментальными данными в области давлений около 100 кПа достигают трех порядков! Для композиции с гидрогелем (0,2% СПГ), имеющей водоудерживающую способность (ОГХ) близкой к суглинку, различия уже не столь велики, и в основном диапазоне капиллярно-гравитационного влагопереноса от 0 до 100 кПа абсолютных значений давлений (потенциалов) влаги можно считать их несущественными. Однако при дальнейшем иссушении в интервале 100-1000 кПа для исследуемой композиции отмечается резкий спад расчетной

влагопроводности вплоть до величин порядка 10^{-6}см/сут, тогда как экспериментальные данные характеризуются величинами порядка 10^{-3}см/сут, то есть опять наблюдается тысячекратные различия. Полученные расхождения ставят серьезную проблему адекватности оценки функции влагопроводности в современных компьютерных моделях энергомассопереноса применительно к грубодисперсным почвам и грунтам и их композициям с биополимерами-почвомодификаторами. По-видимому, это одна из возможных причин последующих расхождений в прогнозных по моделям и реальных трендах динамики влажности почв, столь частых для компьютерного моделирования без предварительной настройки (а по существу – подгонки) моделей.

В следующей части раздела обратимся к анализу ***колоночных экспериментов*** по оценке движения и непродуктивных потерь влаги в грубодисперсных почвах под воздействием гидрогелей, торфяных почвомодификаторов и щебнистых экранов. Эти эксперименты были предприняты для обоснования различных вариантов почвенных конструкций под газонную растительность в аридных условиях стран Персидского залива. В отличие от предыдущего материала здесь преимущественно исследуется массоперенос влаги в состоянии насыщения почвы (режим фильтрации). Для начала рассмотрим результаты экспериментов по фильтрации влаги в 10 см стеклянных колонках с пылевато-песчаной пустынной почвой из эмирата Дубаи (О.А.Э). Исходный субстрат обладал высокой водопроницаемостью – коэффициенты фильтрации ($К_ф$) 220-230 см/сут при плотностях сложения порядка 1,4 г/см^3 (табл. 4.3).

Комбинация песка с рабочей дозой 0,1% СПГ в случае использования сухого порошка геля снижает коэффициент фильтрации в 1,4 раза (до 159 см/сут), а если гель вносился в частично набухшем состоянии – в 3-3,2 раза (до 72 см/сут). Причем в обоих случаях плотность системы несколько уменьшалась по сравнению с исходной. Использование вариантов смеси 0,1% СПГ + 5% торфа в песке и 0,2% СПГ+10%торфа напротив увеличивают в 2,2-2,6 раза коэффициент фильтрации (табл. 4.3). Очевидно, сказалось сильное разрыхление песка (ρ_b =0,7-0,9 г/см^3) частицами торфа.

Заметим, что использовавшийся в эксперименте торф из

Таблица 4.3. Колоночные эксперименты по фильтрации влаги в пылевато-песчаной пустынной почве (О.А.Э) и ее композициях с кондиционерами

Материалы и их композиции	$К_ф$,см/сут	ρ_b, г/см^3	ОП%
Гомогенные смеси			
аридный пылеватый песок	235,1	1,44	45,7
аридный пылеватый песок	219,9	1,40	46,2
низинный торф	6814,0	0,14	90,9
0,1%СПГсух	159,0	1,31	50,0
0,1%СПГвл	71,8	1,38	48,5
0,1%СПГ+5%торф	527,0	0,89	65,5
0,2%СПГ+10%торф	572,0	0,71	72,1
Гетерогенные слоистые системы			
песок/ 100%торф/песок	13,7	1,16	55,6
песок/ 100%СПГ/песок	5,7	1,38	47,9
песок/ 0,1%СПГ+5%торф/песок	176,1	1,3	50,9
песок/ 0,2%СПГ+10%торф/песок	120	1,36	48,3
песок/ 0,1%СПГ/песок	18,9	1,47	44,5
песок/ 0,1%СПГ/песок	2,9	1,54	42,9
песок/ 0,2%СПГ/песок	24,8	1,48	44,2
песок/0,1%СПГ/песок/5%торф/песок	5,6	1,44	45,6

ОП% - общая пористость образца (осредненная по всему объему колонки)

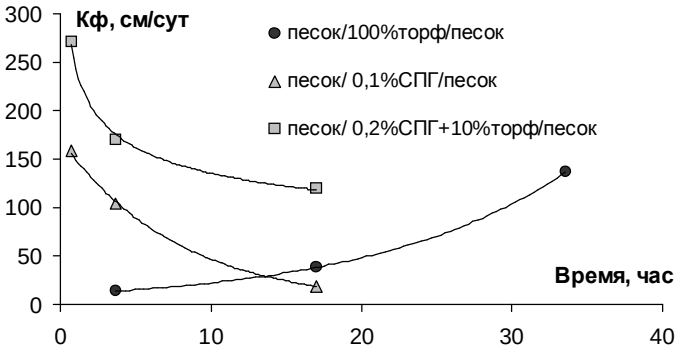


Рис. 4.29. Динамика коэффициента фильтрации в искусственных органо-минеральных композициях на основе пустынного песка (Дубаи).

Подмосковного месторождения (Яхрома) сам фильтровал воду со скоростью 6814 см/сут в десятки раз быстрее, чем аридный песок. Однако, если торф не размешивался с песком, а вносился в том же количестве в виде сплошного слоя в середину колонки с песком в сухом виде, коэффициент фильтрации такой системы первоначально снижался до 14 см/сут (в 16-17 раз). Правда, повторные эксперименты с той же колонкой, проведенные через ≈ 0,5 суток и через сутки выявил постепенное возрастание $К_ф$ до 137 см/сут. По-видимому, первоначально гидрофобный подсушенный торф набрал воду и стал проводить ее с большей интенсивностью. Вместе с тем этот эксперимент вслед за классическими работами А.Ф. Лебедева и Н.А. Качинского [Шеин, 2005], показал, что ***слоистый способ закладки*** органических материалов может приводить к существенному падению фильтрационной способности грубодисперсных пористых сред. В дальнейших экспериментах этот способ был использован и для композиций с гидрогелем. Так смесь 0,1% СПГ + 5% торфа, будучи помещенной в виде слоя в центр колонки с песком, снизила собственную влагопроводность в 3 раза (от 527 до 176 см/сут), а $К_ф$ исходного песка в 1,3 раза. Аналогичная смесь с повышенной концентрацией торфа и геля (0,2% СПГ+10% торфа) в виде слоя посреди песка первоначально продемонстрировала близкий к субстрату коэффициент фильтрации (272 см/сут), однако через сутки, когда органические компоненты набухли и, возможно привели к сужению и кольматации части влагопроводящих путей, эта величина опустилась до 120 см/сут, то есть стала вдвое ниже, чем в гомогенном песке (табл. 4.3, рис. 4.29).Вместе с тем комбинации торфа и геля в целом нельзя признать удачными. Как и в случае водоудерживающей способности (рис.4.13), они взаимно нивелируют свои позитивные гидрофизические свойства, имеющиеся у каждого из этих компонентов по отдельности.

Еще одна интересная закономерность, выявленная в данной серии экспериментов, сводится к постепенному снижению во времени $К_ф$ слоистых систем с СПГ, очевидно по мере реализации их набухания и кольматации макропор (рис. 4.29). Так комбинация «песок/0,1% СПГ/песок» (слой смеси с гелем 3 см в 10 см колонке) первоначально имела $К_ф$=158

см/сут, однако в течение 17 часов эксперимента эта величина постепенно упала до 19 см/сут, то есть более чем в 8 раз. Относительно исходной влагопроводности песка результирующее падение $К_ф$ слоистой конструкции было более чем на порядок (в 12 раз).

Увеличение мощности слоя 0,1% влажного геля посредине песчаной колонки до 5см (половина длины колонки) и уплотнение (до 1,54 г/см^3) привели к результирующей величине $К_ф$ в 2,9 см/сут, – в 80 раз меньше, чем в исходном песке! Более высокая концентрация СПГ (0,2%) в виде слоя 1,5см мощности в центре колонки с песком снижала влагопроводность последнего в 9,5 раза до 25 см/сут (табл. 4.3). Наконец, еще один вариант слоистой конструкции – 0,5см слой чистого (100%) набухшего СПГ, не смешанного с песком и расположенного в середине колонки, оказался не менее эффективным при минимальных механических усилиях при подготовке композиции. Величина $К_ф$ на заключительных стадиях фильтрации в течение 17 часов снизилась здесь с первоначальных значений 15-20 см/сут до 5,7 см/сут или в 39-40 раз относительно водопроницаемости исходного песка. Столь же высокой эффективностью при отсутствии уплотнения обладала лишь достаточно сложная многослойная система с перемежающимися через песок слоями 0,1% СПГ (3см) и 5% торфа (2см), коэффициент фильтрации которой в первый час составил 12 см/сут, а через 17 часов – 5,6 см/сут (табл. 4.3).

Помимо инфильтрации под напором при поливах и физического испарения значительные потери влаги из корнеобитаемой толщи в аридных пылевато-песчаных субстратах могут происходить при ***капиллярном рассасывании***. На рисунке 4.30 приведены результаты колоночных экспериментов, иллюстрирующие данное положение. Во всех экспериментах в срединной части колонки формировался слой увлажненного в пределах КВ-ПВ (22-25%) песка или его смеси с гелем порядка 3-4см, после чего начиналось перемещение влаги в верхний и нижний концы колонки под действием градиента капиллярно-сорбционного давления со стороны находящегося там воздушно-сухого (W=2-3%) почвогрунта. Как видно из диаграмм, иллюстрирующих продвижение фронта жидкости (серый цвет – вода в песке, серый с «каплями» – вода

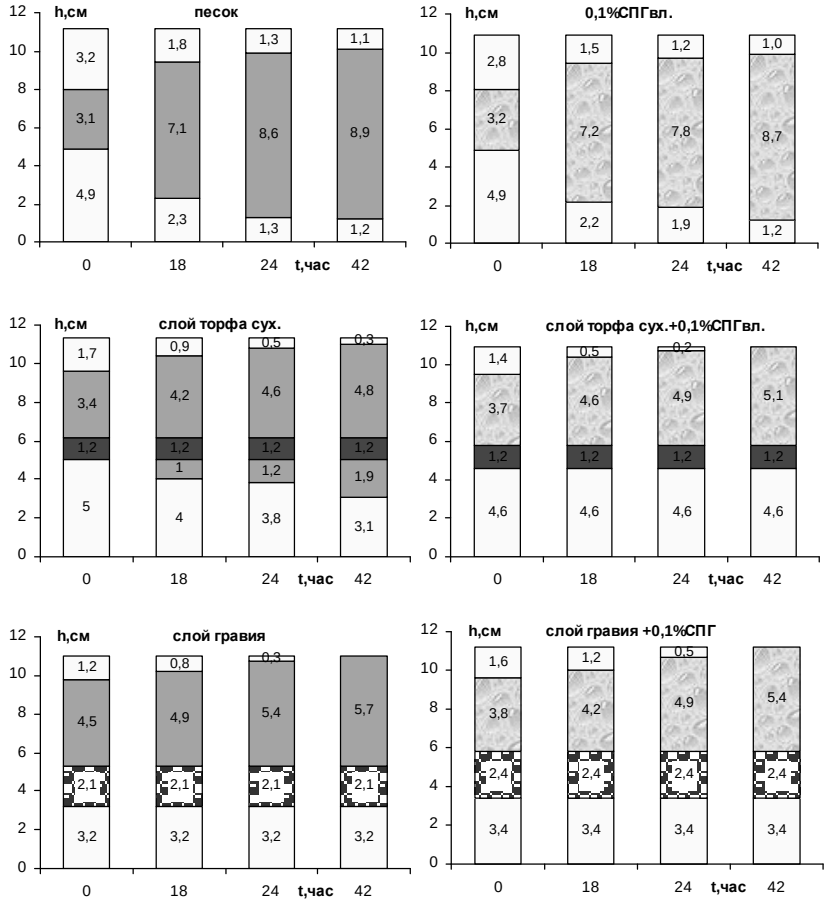


Рис. 4.30. Динамика капиллярного рассасывания влаги в аридной пылевато-песчаной почве (О.А.Э), композициях с СПГ, торфом и слоистых конструкциях на ее основе; h,см – мощности исходных слоев и положение верхней и нижней границ увлажненного срединного слоя (фронтов впитывания).

в композициях песка с СПГ), срединный слой достаточно быстро теряет влагу, которая рассасывается капиллярно в оба конца колонки. На доминирование капиллярного механизма без особого участия гравитации указывает симметричность верхнего и нижнего фронтов впитывания влаги. Подобный механизм рассасывания поливной влаги в природных условиях,

к сожалению, может нивелировать преимущества слоистых конструкций на основе смесей с СПГ, получаемые для фильтрационного режима влагопереноса (табл. 4.3), особенно в тонкодисперсных (пылеватых) песках и супесях эолового генезиса, распространенных в аридных условиях. Здесь мало добиться высокой влагоемкости (водоудерживающей способности) и замедления инфильтрации поливной влаги вглубь почвы. Необходимо наряду с этим искать пути лимитирования капиллярного оттока влаги, что, кстати, имеет первостепенное значение и при борьбе с вторичным засолением. Ведь именно капиллярный механизм лежит в основе этого крайне негативного явления, когда растворенные соли с восходящим капиллярным током влаги продвигаются к испаряющей поверхности и выпадают там в осадок, приводя к неприемлемым для растений условиям засоления.

На наш взгляд здесь могут быть ***два основных пути решения проблемы***. Первый, наиболее трудоемкий – отсечение корнеобитаемой толщи инородным материалом (экраном) с резко отличными от вмещающего почвогрунта капиллярными свойствами, а лучше вообще с отсутствием таковых (грубодисперсная прослойка с размерами зерен, более 1-2мм). Так в анализируемых опытах (рис. 4.20) верхний слой увлажненного песка или его смеси с СПГ подстилался слоем достаточно сухого (W=114%) низинного торфа (1,2см) или речного гравия (2,4см). В результате капиллярное рассасывание влаги вниз резко ограничивалось, а в большинстве случаев – вообще прекращалось. Лишь в конструкции, где над торфяным экраном находился увлажненный до 24% слой аридного песка, были обнаружены перенос влаги через экран вниз и частичное рассасывание по направлению к нижнему концу колонки. В остальных трех вариантах (торфяной экран и 0,1% смесь СПГ с влажным песком над ним, влажный песок и влажная 0,1%смесь песка с гелем над гравийным экраном) капиллярное движение влаги было только вверх, а песчаная толща под экраном оставалась сухой.

Как показывают теоретические расчеты и полевые эксперименты со слоистыми конструкциями, данный технологический способ позволяет подвешивать поливную влагу в корнеобитаемой толще, обеспечивая надежную защиту

от вторичного засоления [Смагин и др., 2008]. Его прототипом можно считать известный в народе на Руси метод повышения влагоемкости однородных по гранулометрическому составу песков путем закладки в них прослойки гравия, ракушечника или даже хвороста [Гаель, Смирнова, 99]. В настоящее время он научно обоснован и использован в технологиях почвенного конструирования для стран Персидского залива в российско-арабском проекте «Arid Grow» [Смагин, 2006, Smagin et al., 2005].

Второй (альтернативный) способ, по-видимому, может быть не менее эффективным при существенно меньших финансово-организационных затратах. Он заключается в ***предварительной гидрофобизации*** подпочвенных слоев растворами (а возможно парами, аэрозолями) ПАВ, разрушающими их капиллярность и рассасывание влаги вглубь почвы. В природе его аналогом может служить подвешивание влаги осадков до состояния близкого к полной влагоемкости на пересушенных песках, временно становящихся гидрофобными (не смачиваемыми) [Гаель, Смирнова, 99]. Для обоснования этого способа были предприняты экспериментальные исследования по влиянию различных гидрофобных и амфифильных веществ на высоту и кинетику капиллярного поднятия в почвах легкого гранулометрического состава (рис.4.31-4.33) . В качестве гидрофобизаторов использовались: ацетоновый экстракт с нефтяными углеводородами, бытовые препараты в виде аэрозолей «Chirton» (бутан, пропан, смесь восков, смесь силиконов, керосин, вода) и «Universal SMS Waterproof» (синтетические смолы, пропан, бутан), а также растворы метилсиликоната калия (торговая марка СОФЭКСИЛ®-40 (ТУ 2229-008-42942526-00 с изм.1-2)); разработка и реализация ЗАО НПО «СОФЭКС» (www.sofex.ru).

Последний препарат широко используется в самых различных областях, связанных со строительством и материаловедением: при защите от влаги стройматериалов и конструкций, изделий из гипса, керамики, известняка, бетона, кирпича и т.д., в производстве бетона, цемента, тротуарной плитки, бордюрного камня, для горизонтальной гидроотсечки в фундаментах методом пошагового бурения и инжекции. Срок службы металлорганического гидрофобного покрытия не менее

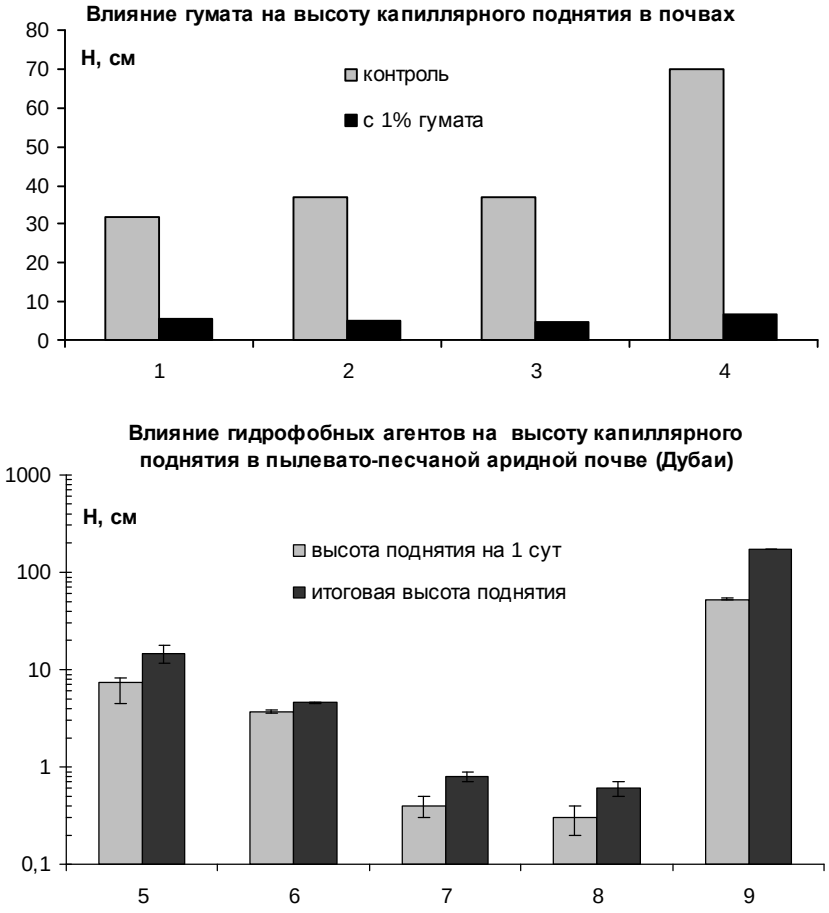


Рис. 4.31. Высота капиллярного поднятия в почвах легкого гранулометрического состава под воздействием гидрофобных и амфифильных агентов. 1 – дерново-боровая песчаная почва (Бузулукский бор), 2 – дерново-подзолистая супесчаная почва (Москва), 3 – черноземовидная супесчаная почва (Волгоград), 4, 9 – аридная пылевато-песчаная почва (Дубаи), 5 – гидрофобизация нефтяным экстрактом (1%), 6 – гидрофобизация аэрозолью «Chirton»(0,8%), 7 – гидрофобизация аэрозолью «Universal SMS»(0,5%), 8 – гидрофобизация метилсиликонатом К (0,2%). **Аналитики – И.С.Росете, И.Л. Пепелов.**

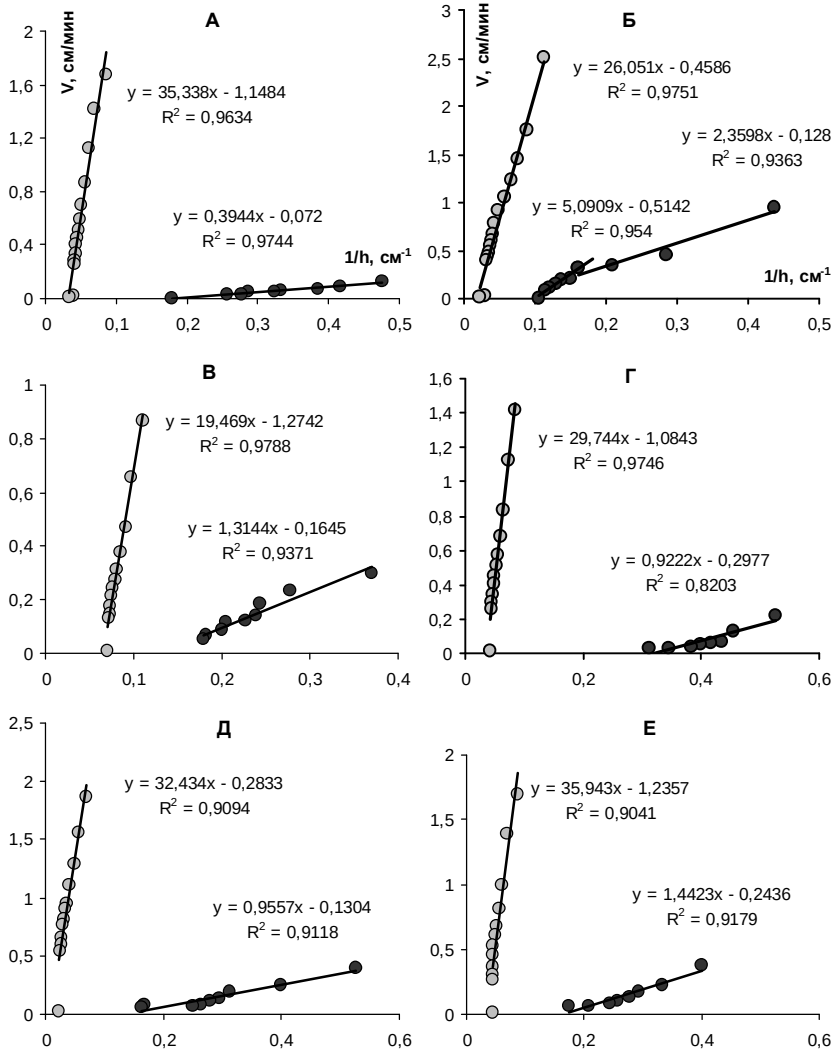


Рис. 4.32. Скорость капиллярного поднятия в почвах легкого гранулометрического состава под воздействием гуматов. А – дерново-боровая песчаная почва (Бузулукский бор), Б –дерново-боровая песчаная почва (Читинская обл), В – полиминеральные Терско-Кумские пески, Г -черноземовидная супесь, Волгоград, Д – аридная песчаная почва Дубаи, Е – аридный песок Бахрейна; серые символы – нативная почва, черные –1% гумат.

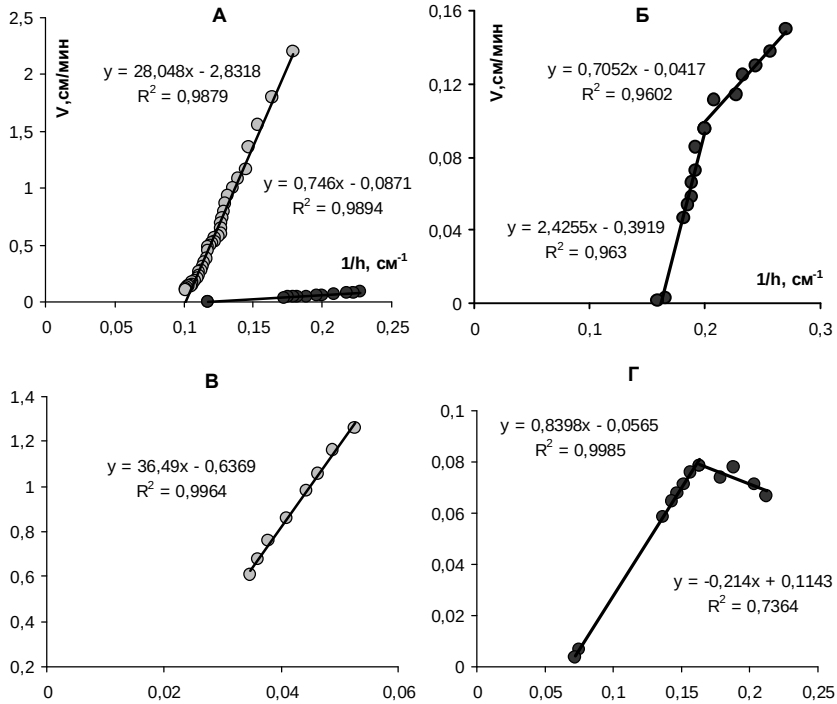


Рис. 4.33. Скорость капиллярного поднятия в почвах легкого гранулометрического состава под воздействием гидрофобизаторов. А – мономинеральный кварцевый песок и 5% р-р мелитсиликоната К, Б – то же с 10% р-р мелитсиликоната К, В – аридная карбонатная пылевато-песчаная почва О.А.Э., то же с 1% нефтяным гидрофобизатором; серые символы – контроль, черные – гидрофобизированные образцы. **Аналитик – И.С.Росете.**

5 лет. Идея его использования для управления гидрофизическими свойствами почв и грунтов принадлежит аспиранту кафедры физики и мелиорации почв И. Л. Пепелову, выполнявшему под руководством автора диссертационное исследование по технологическим свойствам буровых шламов как тонкодисперсных почвенных материалов. Дополнительно аспиранткой И.С. Росете были исследованы амфифильные препараты в виде водорастворимых гуматов из торфяного материала. Все эксперименты проводились в стеклянных

трубках (колоннах) разного размера и диаметра, варьирующими в зависимости от потенциальной высоты капиллярного поднятия и количества почвы. Образцы почв после обработки препаратами подсушивались на воздухе, помещались в стеклянные трубки и устанавливались вертикально в штативы, так, что нижний конец трубки через сетку контактировал с источником (пластиковым стаканом) в котором поддерживался постоянный уровень влаги. Замеры координат фронта капиллярного поднятия осуществлялись визуально с помощью прикрепленных к колоннам отрезков металлической рулетки. Основная часть экспериментов занимала несколько часов рабочего времени, после чего образцы оставлялись на несколько суток до выявления окончательной (равновесной) высоты капиллярного поднятия.

Для оценки кинетики капиллярного поднятия было использовано классическое уравнение этого процесса, аналогичное модифицированному уравнению Дарси для переноса влаги в пористых средах против силы тяжести [Кин, 33, Судницын, 79]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K}{S}\left(\frac{P_к}{h} - 1\right), \qquad (4.1)$$

где где $P_к$ [см. водн. ст.]– капиллярное давление, вызывающее продвижение фронта воды вертикально вверх, , h [см. водн. ст.] – гравитационное давление, противодействующее капиллярному поднятию, К [$см^3$/мин] – водопроницаемость, S[$см^2$] – площадь поперечного сечения почвы в капиллярной колонке. Согласно (4.1) начальная скорость фронта воды (при h=0) бесконечно велика и гиперболически уменьшается до нуля, когда h достигает своего предельного значения $P_к$ (максимальной высоты капиллярного поднятия). Важно отметить обратно пропорциональную зависимость между высотой капиллярного поднятия h и скоростью продвижения влаги dh/dt. Линеаризация этого уравнения в координатах V= dh/dt и 1/h с получением прямолинейной функции вида y=ax–b, очевидно, дает возможность рассчитать высоту максимального капиллярного поднятия по параметрам a и b:

$$P_к = a/b \qquad (4.2)$$

Рассмотрим влияние амфифильных компонентов

(гуматов) на гидрофизические свойства и капиллярное поднятие в легких почвах. Из рисунка 4.31 видно, что 1%-ный раствор гуматов уменьшает высоту капиллярного поднятия у дерново-боровой, дерново-подзолистой и черноземовидной супесей в 6-7 раз, а у аридного песка Дубаи – в 11раз (с 70 см до 6,5 см). Интересно отметить, что при капиллярном поднятии влаги в почве, сам гумат, являясь водорастворимым веществом, тоже понимался к верху колонки. Это говорит о том, что в производственных условиях водорастворимый гумат может концентрироваться в верхних горизонтах при испарении и капиллярном поднятии, а может вымываться за пределы корнеобитаемой толщи при орошении и осадках.

Кинетика капиллярного поднятия вполне соответствовала классическому уравнению (4.1), о чем свидетельствуют высокие коэффициенты детерминации R^2=0,90-0,98 при описании экспериментальных данных линеаризованной формой уравнения. Гуматы приводят к снижению интенсивности капиллярного поднятия в среднем в 5-10 раз и более для большинства исследованных почв разного генезиса и географического распространения (рис. 4.32). По формуле (4.2) из известных параметров линейной аппроксимации данных можно было рассчитать предельную высоту капиллярного поднятия и сравнить результаты по данному показателю для нативных почв и обработанных гуматами. Например, для дерново-боровой песчаной почвы Бузулукского бора из рис. 4.32-А имеем a = 35,34 $см^2$/мин, b = 1,15 см/мин, откуда $Р_к$=35,34/1,15=30,7см. После обработки 1% раствором гумата эта величина снизилась до $Р_к$=0,39/0,07=5,6см, то есть в 5,5 раз. Аналогичные расчеты, проведенные для других почв, подтвердили полученный ранее вывод о снижении высоты капиллярного поднятия в 5-10 раз и более при обработке почв гуматами. Причем максимальный эффект был также отмечен для пылевато-песчаной аридной почвы Дубаи. Расчетная высота капиллярного поднятия здесь оказалась равной 115 см (против экспериментально определенной 70 см величины), а после обработки гуматами снизилась до 7,3 см, то есть более чем в 15 раз.

Интересен еще один экспериментальный результат, а именно – появление излома на линиях зависимости скорости

капиллярного поднятия от обратной высоты после обработки почв препаратами (см, например, 4.32-Б). Подобное изменение скорости впитывания показывает, что кинетика процесса на самом деле более сложная, чем предполагается по классическому уравнению (4.1), и вероятнее всего использовать его для оценки равновесных высот капиллярного поднятия в этих случаях нельзя. Впрочем, такое поведение системы с ПАВ вполне может быть объяснено с позиций классической гипотезы взаимосвязанных капиллярных трубок, лежащей в основе уравнения (4.1). Движение влаги в почве осуществляется с постепенным замедлением по мере исчерпания капиллярных сил трубками (каналами) определенного диаметра. Если распределение подобных трубок в почве достаточно равномерное, снижение скорости будет плавным в соответствии с (4.1). Вначале перестают «тянуть» трубки самого большого размера, потом – поменьше и так далее. И лишь когда самый тонкий капилляр заполнится водой движение прекратится вовсе. На такую «идеальную» картину накладывается еще эффект смачивания – поэтому в опытах с сухой почвой капиллярное поднятие организуется в виде четкого фронта, разделяющего границы смоченной и не смоченной до состояния гидратной пленки зон почвы. Введение ПАВ, способных к гидрофобизации поверхности почвенных частиц, очевидно, равносильно уменьшению числа проводящих воду трубок. Зрительно это можно воспринять как сужение просветов между стенками трубок при адсорбции ПАВ и возникновение сил отталкивания (положительные мениски) вместо капиллярности (мениски с отрицательной кривизной). Если препарата достаточно много на определенной высоте происходит резкое сокращение просветов способных к капиллярности трубок, что и диагностируется на графике кинетики капиллярного подъема как излом.

Подобные эффекты, только более ярко выраженные, наблюдались и в серии экспериментов с собственно гидрофобными веществами (рис. 4.33). Причем в случае нефтяного экстракта перелом оказался столь значительным, что вообще изменил знак в уравнении (4.1) на противоположный, то есть вместо капиллярного поднятия возник эффект гидрофобного отталкивания. В результате для этих экспериментов нельзя было проводить расчет предельных высот

капиллярного поднятия по формуле (4.2). Однако непосредственное наблюдение за фронтом впитывания влаги выявило высокую эффективность используемых гидрофобизаторов в снижении высоты капиллярного поднятия (рис. 4.31). Так для аридной пылевато-песчаной почвы с максимально выраженными капиллярными свойствами обработка 1% нефтяным экстрактом снизила итоговую высоту в 11 раз (со 170 до 15см), аэрозолью «Chirton» в дозе 0,8% – в 37 раз, а аэрозолью «Universal SMS» в дозе 0,5% – в 212 раз. Но наибольший эффект продемонстрировал отечественный препарат СОФЭКСИЛ®-40 – метилсиликонат калия. В дозе всего 0,2% от массы сухой почвы он привел к практически полной блокировке капиллярности, снизив высоту поднятия в 283 раза (со 170 до 0,6 см). Таким образом, проведенные эксперименты позволяют заключить, что гидрофобные ПАВ являются эффективным средством управления водным и солевым режимом грубодисперсных почв и почвенных конструкций. Небольшие количества ПАВ (примерно 0,2%) в виде аэрозолей или водных растворов позволяют практически полностью элиминировать капиллярное поднятие как основной механизм вторичного засоления и загрязнения водорастворимыми формами поллютантов. После проведения надлежащих полевых экспериментов метод гидрофобизации подпочвенных горизонтов может составить альтернативу разработанным ранее приемам почвенного конструирования с грубодисперсными экранами для подвешивания влаги и борьбы с вторичным засолением (загрязнением) корнеобитаемого слоя [Смагин и др., 2008].

В завершающей части раздела вернемся к гидрофильным биополимерам и кратко рассмотрим еще одну важную с технологической точки зрения проблему, а именно – ***транспорта биополимеров*** типа СПГ в состоянии предельного набухания в макропористых средах по типу вязкого течения. Эта проблема решалась также с помощью колоночных экспериментов в фильтрационном режиме (см. гл. 2), причем изучался не только вынос СПГ с промывными водами, но и возможность его закрепления (фиксации) в песчаной толще при подаче в виде раствора с разведением водой, превышающим предельную степень набухания.

Таблица 4.4. Результаты колоночного эксперимента по фиксации и выносу СПГ из кварцевого песка

Число тактов	Концентрация СПГ (в растворе или в почве)	Доля СПГ, удержанного почвой (от исходного содержания в растворе или почве)	Доля вынесенного из колонки СПГ (от исходного содержания в растворе или почве)
Фильтрация раствора гидрогеля			
14	0,25 г/л	96,0%	4,0%
14	0,5 г/л	97,6%	2,4%
Промывка песка с влажным гелем водой			
14	0,048%	97,7	2,3%
14	0,098%	98,7	1,3%

.

Опыт по оценке перемещения и фиксации геля проводился в колонках с тонкозернистым кварцевым песком. Исходно объем раствора геля в перевернутой колбе, поддерживающей на поверхности песка постоянный напор по типу сосуда Мариотта, составил 250 $см^3$. С учетом пористости песка и объема колонки полное прохождение этого объема через колонку соответствовало 14 сменам порового раствора (тактам по [Шеин, 2005]). Были использованы две концентрации СПГ 0,5 и 0,25 г/л (эквивалентная «степень набухания» 2000 и 4000 гH_2O/г геля). При его фиксации в почве, находящейся в колонке, такие количества геля в идеале могли бы обеспечить его концентрацию ≈ 0,05 и 0,1%. Использовать растворы с более высоким содержанием СПГ не имело смысла, поскольку фильтрация была бы сильно затруднена. Так время фильтрации 250 мл чистой воды без полимера через колонку с песком составило всего 32 минуты. При растворении СПГ (0,5 г/л) время фильтрации при том же числе тактов (14) увеличилось до 5 суток. Очевидно, с физической точки зрения здесь сказалась повышенная вязкость раствора СПГ по сравнению с чистой водой, поскольку все остальные условия опыта оставались идентичными.

В результате снижение коэффициента фильтрации при

использовании растворов СПГ вместо воды составило 20-200 раз! Так при исходном $К_ф$ для воды порядка 787 см/сут, предельная величина для СПГ с концентрацией 0,25 г/л была равной 35 см/сут, а для геля при концентрации 0,5 г/л – всего 4см/сут.

На выходе из колонки фильтрат был исследован методом Тюрина в модификации Никитина [Воробьева, 98] на содержание органического углерода с последующим пересчетом на массу СПГ. В результате оказалось, что основная часть СПГ (96-97%) зафиксировалась в песке, а стекала практически чистая вода (табл. 4.4). Этот факт наводит на мысль об еще одном помимо повышения вязкости механизме снижения фильтрации в песке, а именно – кольматировании влагопроводящих путей сгустками геля, легко отдающими воду. Последующая промывка колонки чистой водой с тем же числом тактов показала, что подвижность СПГ в почве остается невысокой, и вынос не превышает первых процентов от количества зафиксированного геля в порах тонкозернистого песка (табл. 4.4).

Полученные результаты позволяют обосновать ***эффективный технологический прием*** внесения СПГ в почву с поливными водами в концентрации порядка 0,25 г/л. Очевидно, таким путем можно не только исходно вносить СПГ в почву при поливном земледелии, но и компенсировать его потери при биодеструкции. Вязкий раствор геля будет значительно (на 1-2 порядка) понижать фильтрацию поливной влаги, и возможно, уменьшать испарение. Этот способ следует опробовать в производственных условиях, и в случае подтверждения его эффективности, включить в арсенал современных инновационных технологий почвенного конструирования и оптимизации водного режима почв в поливном земледелии на базе природных и синтетических биополимеров.

4.3. Граничные условия: исследование эвапотранспирации в почвогрунтах и слоистых конструкциях.

Основополагающим принципом расчета ирригационного режима в системе технологий почвенного конструирования

является удовлетворение эвапотранспирационных потребностей растительности, поскольку они напрямую определяют продуктивность (урожайность) и устойчивость зеленых насаждений (§ 1.1, рис. 1.1-1.2). Величина потенциальной транспирации, наряду с испарением и осадками (поливами), закладывается в виде верхнего граничного условия в гидрофизические модели для моделирования водоудерживающей способности и водообеспеченности растений на расчетные периоды их роста и развития при подборе оптимальных параметров почвенных конструкций. Каждому растению нужно обеспечить столько воды, сколько оно может потребить за данный промежуток времени, не изменяя продуктивность. В наиболее простом случае необходимо определять лишь климатическую характеристику – испаряемость влаги по которой, зная коэффициент продуктивности, для данной культуры, легко оценить потребность того или иного растения в воде (см.§ 1.1). Оценка испаряемости может производиться по данным о динамике температуры и относительной влажности воздуха, измеряемых автоматически датчиками «гигрохрон» [Смагин и др., 2006, 2008]. При более детальном подходе исследуются ***зависимости эвапотранспирации*** конкретных растительных культур от характеристик почвы, атмосферы, качества поливной влаги. С этой целью на кафедре физики и мелиорации почв и почвенном стационаре МГУ им. М.В. Ломоносова были предприняты комплексные ***вегетационные опыты*** для определения потребностей газонных трав в воде на различных стадиях роста и при различных температурных условиях. Опыты производились н.с. И.И. Гудимой, доц. Л.Г. Богатыревым и к.б.н В.Ф. Басевичем и поскольку лишь небольшая часть результатов была опубликована ранее [Smagin et al., 2007], здесь мы приводим более подробно описание этих экспериментов и их анализ после необходимой обработки данных.

В вегетационные сосуды с различным наполнением были помещены три образца дернины газона из злаково-осоковой культуры (Paspalum hybrid), использующейся при озеленении муниципальных объектов ряда стран Персидского залива со средним весом около 2 кг и общей площадью около 314 $см^2$. В других сосудах также с различным наполнением были посеяны

смеси газонных трав овсяницы, мятлика и райграса, взятых в соотношении 70, 20 и 10%. Каждый из сосудов в течение 23 дней взвешивался, и дефицит влажности восполнялся по убыли в весе. Одновременно определялось испарение с водной поверхности (потенциальная испаряемость). В течение всего периода измерялась температура открытой поверхности и в тени. Ниже приводится описание вариантов опыта (рис. 3.21).

Вариант 1. В сосуде газон помещался на слой песка (пылеватый песок из О.А.Э. Дубаи) мощностью 5см, который предварительно перемешивался с замоченным до этого сильнонабухающим полимерным гидрогелем (СПГ) на основе радиационно-сшитого полиакрлнитрила. Концентрация СПГ составляла около 0,1% по весу к песку. Ниже слоя располагался тот же песок. Влажность в сосуде поддерживалась на уровне 20%.

Вариант 2. В сосуде газон помещался на слое песка мощностью 5см, далее шел слой торфа, мощностью также 5см, ниже до конца сосуда находился песок. Торф после высушивания изначально увлажнялся до 18%

Вариант 3. В сосуде газон помещался на слое смеси торфа с песком с содержанием торфа 10%. Ниже помещался слой песка с содержанием СПГ 0,1%. Влажность поддерживалась около 50%. Вариант 4. Посев смеси травы в сосуде с песком и 0,1%

(по наполнению сосуд аналогичен №1)

Вариант 5. Посев смеси травы на песке с торфяной прослойкой (по наполнению сосуд аналогичен №2)

Вариант 6. Посев смеси трав на песке с торфом (по наполнению сосуд аналогичен №3). После проведения экспериментов содержимое сосудов послойно взвешивалось в соответствии с описанными для каждого варианта опыта слоями. Эксперимент проводился в вегетационном домике закрытого типа почвенного стационара МГУ. Результаты представлены в таблице 4.5.

В период проведения эксперимента температурный режим, особенно в начальный период исследования оказался весьма близким к естественным аридным условиям или периодам сильных засух в г. Москве. Так, максимальная температура поверхности достигала в отдельные дни

Таблица 4.5. Эвапотранспирация (в мм/сут) по результатам ежесуточного взвешивания вегетационных сосудов в зависимости от температуры.

Сосуды\ дни	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№1	3,8	4,8	2,6	1,9	4,1	4,8	3,2	4,9	8,6	4,8
№2	7,3	3,8	4,1	3,8	4,8	4,5	3,5	6,3	9,9	5,7
№3	5,4	5,7	3,2	1,9	4,5	5,1	1,9	6,3	7,6	6,4
№4	10	2,9	2,9	2,9	1,6	-	-	1,4	2,6	1,6
№5	8,6	3,8	1,0	0,6	1,3	1,9	1,3	1,0	1,6	2,2
№6	8,0	4,8	4,8	2,8	5,1	5,4	2,6	5,4	5,7	5,1
Температура ^{o}C-1	42	38	33	28	31	36	36	43	34	31
Температура ^{o}C-2	35	33	31	24	28	30	30	32	32	29

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
4,1	4,1	4,5	5,7	4,5	6,1	5,1	2,1	1,0	1,0	1,0	2,2	1,3
3,8	3,8	5,1	5,4	4,1	4,8	5,7	1,3	1,3	1,0	1,0	2,6	1,3
3,5	3,8	3,2	6,1	4,8	5,4	4,8	1,9	1,6	1,6	1,0	3,2	1,0
2,2	2,4	2,2	2,1	2,7	2,2	1,9	1,6	-	-	-	2,2	1,0
0,6	1,1	1,0	1,1	0,6	1,0	1,3	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6
4,1	4,2	4,1	5,7	4,5	5,4	4,8	3,2	0,6	0,6	0,6	2,6	3,2
49	45	44	45	31	45	23	23	18	17	17	19	22
32	29	28	31	28	29	23	23	18	17	17	19	22

Примечание: Температура ^{o}C-1 – на открытых участках, Температура ^{o}C-2 – в тени.

наблюдений 40-45^{o}C. Общая эвапотранспирация колебалась в зависимости от вариантов опыта в значительных пределах от 0,6до 10 мм/сут. Полученные результаты можно разделить на две группы. Первая группа данных характеризует период с повышенной температурой воздуха (2-18 июля), а второй – с пониженной (19-25июля), когда температура воздуха в связи с похолоданием резко снизилась до 17-18 градусов. Именно в этот период, как и следовало ожидать, эвапотранспирация по всем вариантам опыта резко снизилась. Уже эти результаты исходно показывают, что эвапотранспирация в основном определяется ***температурой и дефицитом влаги***, которые в первый период эксперимента были весьма высокими и близкими к естественным аридным условиям.

По вариантам опытов можно отметить следующее.

Вегетация газона на смеси геля с песком (№1) в первый жаркий период сопровождалась эвапотранспирацией порядка 2-8 мм/сут при средних величинах 4-5мм/сут. В холодный период этот показатель снизился до 1-2мм/сут. Эвапотранспирация на песке с прослоем торфа (№2) в жаркий период составила 3-10мм/сут при средних величинах также 4-5мм/сут и снижении до 1-2мм/сут в холодный период. На смеси песка с торфом, подстилаемой 0,1% СПГ (№3), максимальная эвапотранспирация в жаркий период не превысила 6мм/сут, но средние величины колебались в пределах 3-6мм/сут. В тенденции прослеживалась такая закономерность – наиболее часто минимальные величины эвапотранспирации встечались во втором варианте.

Особенную ценность представляют фенологические наблюдения в сочетании с исследованием корневых систем по вариантам опыта. Подчеркнем, что для всех вариантов было характерно удовлетворительное состояние травостоя. Прирост был достаточно интенсивным, при этом дважды проводилось скашивание газонной трави, а также периодическая имитация уплотнения газона. Практически это не оказало видимого влияния на характер вегетации травы и скорость прироста. Установлено также, что по внешним признакам газонная смесь лучше выглядела в жаркий период и несколько хуже – в холодный, что можно объяснить физиологическими особенностями данного вида. Наилучшее развитие корневых систем обнаружено в варианте №1. При разборке вегетационного сосуда оказалось, что корни проникли почти на всю глубину сосуда. Кроме того, дернина за период эксперимента прочно укрепилась в слое песка с гелем, так, что необходимо было приложить определенное усилие, чтобы отделить ее от почвы.

Во втором варианте корневые системы, очевидно в силу высокой влагоемкости торфа, не стали проникать глубже и не образовали подобной прочной связи с песком. В третьем варианте дернина газона чрезвычайно легко отделялась от нижележащей смеси торфа с песком. Таким образом, наиболее лучшее укоренение газона следует ожидать при использовании смеси СПГ и песка.

Посев травосмесей позволил установить еще одну важную

технологическую особенность. При использовании для посева смеси с торфом (№6) всходы появляются со значительным опережением, составляющим почти двухнедельный срок. К концу эксперимента травостой на этом варианте достиг высоты 20-30см. тогда как по другим вариантам не превысил 3-5см (№4) и 1-2см (№5). В последнем случае, очевидно, сработало экранирование слоем песка от плодородной торфяной прослойки, куда не успели проникнуть корни при развитии трав из семян. В вариантах №№4,5 всходы были слабые, желтоватой окраски, что свидетельствует о недостаточном минеральном питании. На смеси же торфа с песком травостой характеризовался интенсивной зеленой окраской, а в поверхностном горизонте стала образовываться небольшая дернина, которая уже скрепляла субстрат. Таким образом, при посадке газонной травы кустами (технология, распространенная в ландскейпинге аридных регионов) следует использовать слоистые конструкции с прослоями из торфа (почвомодификаторов) или СПГ, тогда как при посеве семенами незаменимы торфосмеси.

Пропорционально биомассе, наибольшая эвапотранспирация установлена для варианта выращивания травосмесей на торфяно-песчаном субстрате (№6). По значениям она вполне сопоставима с вариантами №№1-3, где выращивался уже сформированный взрослый газон с максимальными потребностями к увлажнению. В целом исследование показало, что даже в жаркий период транспирация газонных трав в среднем составляет 5-6(7) мм/сут, что существенно меньше обычных норм 10-15мм/сут в жаркое время для исследованных нами газонов в странах Персидского залива (Дубаи. Бахрейн, Катар). Это означает возможность как минимум двукратной экономии влаги при правильной организации поливов и создании почвенных конструкций на основе российских органогенных материалов, снижающих непродуктивные потери на внутрипочвенный сток поливной влаги [Смагин и др., 2008]. То же следует сказать и о поливах спортивных газонов, которые могут быть сокращены в 2-3 раза без ущерба для растительности, если только не будет агрохимического прессинга в виде легкорастворимых солей удобрений, резко снижающих доступность влаги растениям (см.

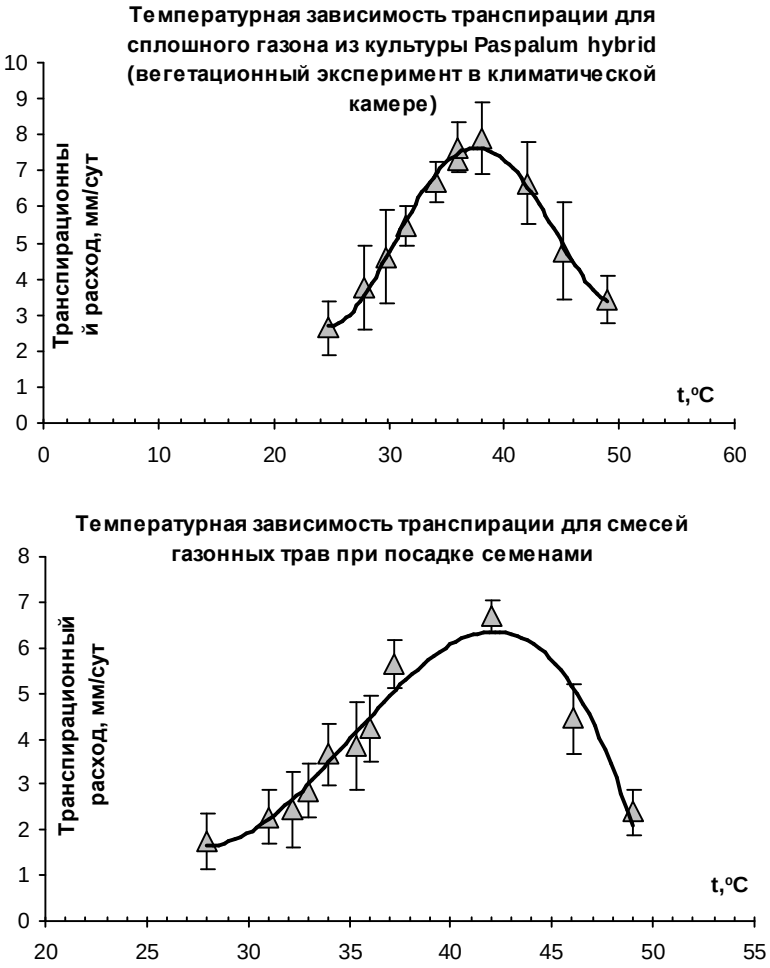


Рис. 4.34. Варианты температурных зависимостей транспирации влаги сплошными газонами и посевами трав при оптимальном водообеспечении.

§ 1.4).

Обработка данных проведенных вегетационных опытов и дополнительных экспериментов в климатической камере на кафедре физики и мелиорации почв МГУ позволила получить функциональные зависимости транспирационых расходов

газонной растительности в варианте сплошной (сформировавшейся) дернины (Paspalum hybrid) и на стадиях роста посевов травосмеси из овсяницы, мятлика и райграса (рис. 4.34). Как видно оба варианта характеризуются однотипным ходом зависимости транспирации от температуры, а именно функцией с одновершинным экстремумом, приходящимся на температурный диапазон порядка 38-43^{o}C. Наблюдаемый при этом максимальный транспирационный расход влаги, как уже отмечалось, редко превышает 6-7мм/сут и определяется физиологическими особенностями исследуемых травянистых культур. Такие величины соответствует пределу транспирационных возможностей данного вида растений, которые проявляются только при экстремально высоких температурах при обильном снабжении корней влагой, когда растение вынуждено тратить воду не только на обеспечение фотосинтеза, но и на охлаждение поверхности листвы за счет испарения. Дальнейший рост температуры, по-видимому, приводит к дисфункциям транспирирующих органов и их постепенному отмиранию, с чем связано достаточно резкое падение транспирации. При более вероятных для засушливых сезонов в мегаполисе температурах порядка 25-30^{o}C транспирация не будет выходить за пределы 3-4мм/сут. Такой расход означает, что это за вегетационный сезон порядка 100 дней будет потрачено ~300-400мм почвенной влаги или (3000 - 4000 т/га) и при обычных для трав транспирационых коэффициентах в диапазоне 700-1000 единиц (см. §. 1.1) это будет эквивалентно формированию фитомассы от 30 до 50 до ц/га, то есть высокопродуктивных зеленых газонов. Отметим, что приводимые величины транспирации следует считать ***потенциальными***, поскольку они получены при оптимальном водообеспечении, когда растениям нет необходимости сокращать испарение путем регуляции устьиц при недостатке влаги в почве. Эти величины и используются в современных почвенно-гидрофизических моделях типа HYDRUS для задания верхнего граничного условия при поливариантных прогнозах динамики влаги, водообеспеченности и продуктивности растений в различных почвах и почвенных конструкциях.

Потери влаги из почвы на ***физическое испарение*** обычно уступают транспирации, особенно под сомкнутым травостоем,

где дернина газона формирует своеобразный мульчирующий слой, защищающий поверхность почвы от испарения. Сам процесс физического испарения во многом определяется такими взаимосвязанными свойствами почвогрунта как его гранулометрический состав, пористость (плотность), структурное (агрегатное) состояние, водоудерживающая способность и, главное, содержание влаги. В зависимости от последнего различают быструю и медленную стадии испарения, связанные с доминированием того или иного физического механизма транспорта влаги [Шеин, 2005]. На стадии быстрого испарения подток почвенной влаги к испаряющей поверхности осуществляется капиллярным путем в виде восходящих токов жидкости (почвенного раствора). С этими токами в засоленных почвах на поверхность выносятся легкорастворимые вещества, где они выпадают в осадок и концентрируются, приводя к так называемому эффекту «вторичного засоления» – основному фактору деградации аридных поливных земель и отдельных территорий гумидных мегаполисов, где используются противогололедные препараты и (или) химические удобрения в больших дозах (см. §§. 1.1, 1.4). По мере иссушения поверхностного слоя испарение быстро замедляется, поскольку по достижении критических значений влажности разрыва капиллярных связей (ВРК) быстрый объемный капиллярный ток жидкости сменятся на более медленный пленочный (капиллярно-менисковый), и в конечном итоге – на парофазный массоперенос (диффузию молекул воды в виде водяного пара), происходящий крайне медленно (рис. 4.35). На этой стадии соли, естественно, уже не могут двигаться и выпадают в осадок в зависимости от концентрации и величин произведения растворимости при той или иной влажности внутри почвы. Для почв легкого гранулометрического состава стадия медленного испарения наступает уже по прошествии нескольких суток после обильного увлажнения и промачивания почвы (рис. 4.35), поскольку капиллярные эффекты в таких почвогрунтах незначительны, и высота капиллярного поднятия, за пределами которой наступает эффект ВРК, здесь редко превышает десяток сантиметров. Поэтому почвы легкого гранулометрического состава являются «накопителями» влаги атмосферных осадков и грунтовых вод [Гаель, Смирнова, 99].

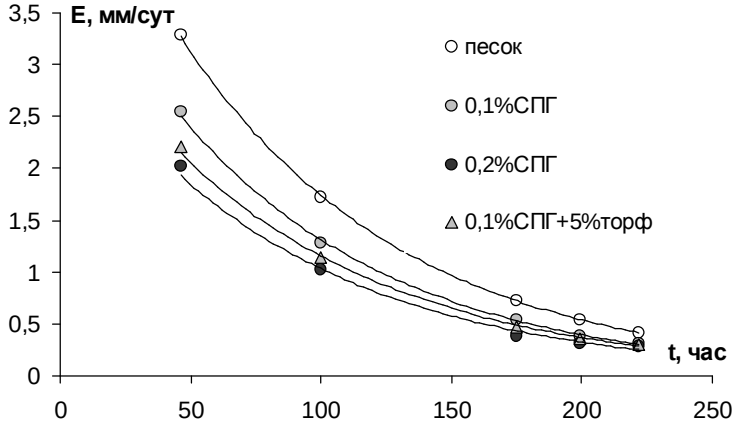


Рис. 4.35. Динамика физического испарения (Е, мм/сут) из аридной пылевато-песчаной почвы (О.А.Э) под воздействием синтетических и природных биополимеров (по [Смагин, Садовникова, 2009]).

Значительное воздействие на физическое испарение могут оказывать биополимерные материалы и почвомодификаторы, связывающие воду и увеличивающие водоудерживающую способность почв. Так эксперименты с почвенными колонками, обсуждаемые в предыдущем разделе, выявили связь между величинами непродуктивных потерь влаги при испарении с дозами гидрогеля и его комбинации с торфом (рис. 4.35). Испарение заметно (в 1,3-1,9 раз) понижалось по сравнению с контролем, способствуя консервации почвенной влаги, пропорционально дозе (концентрации) почвомодификаторов. Сходные результаты были получены нами и в производственных условиях при испытании слоистых почвенных конструкций на основе СПГ и торфа [Смагин, Садовникова, 2009].

4.4. Деструкция биополимеров в почвенных конструкциях и ее моделирование.

Деструкция органических веществ, использующихся при формировании почв и почвенных конструкций под влиянием

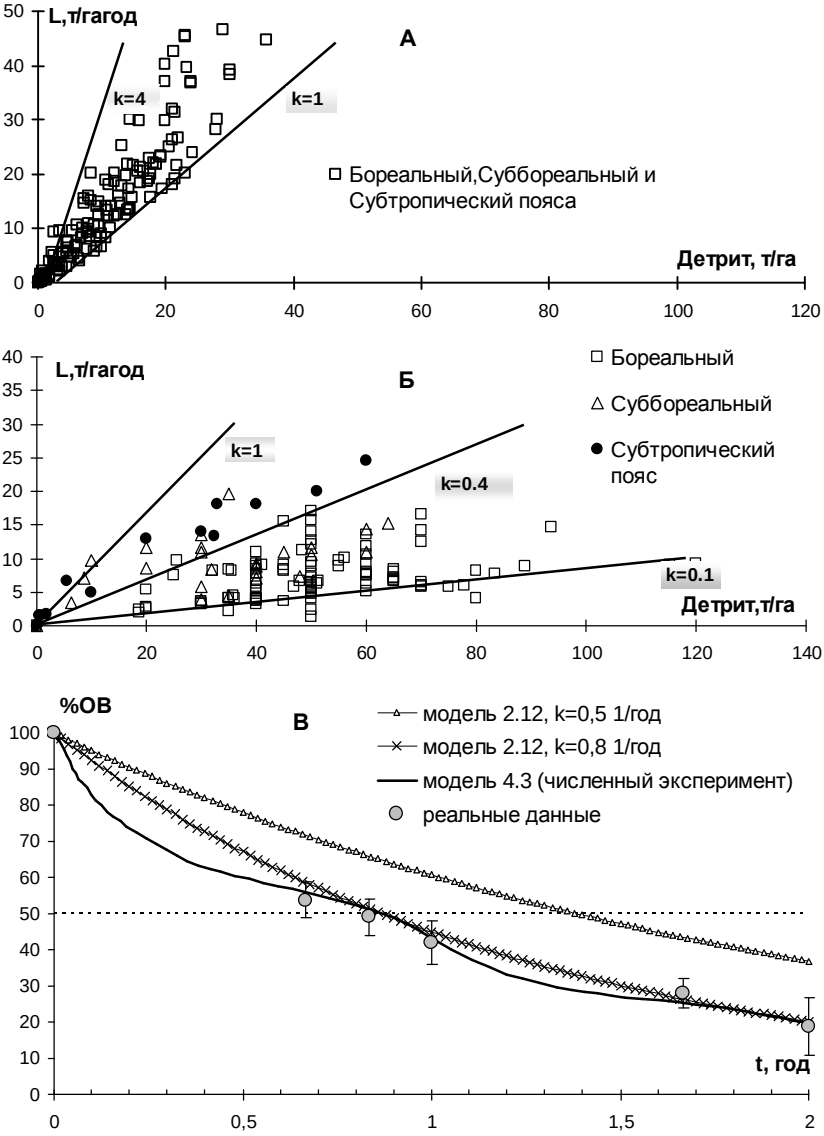


Рис. 4.36. Кинетика биодеструкции детрита и моделирование разложения ОВ торфа как компонента растительного грунта городских конструктоземов (пояснения в тексте) .

микроорганизмов и абиотических агентов окружающей среды является одним из наиболее серьезных факторов деградации рукотворных почвенных объектов. Эта проблема уже обсуждалась в главе 1, где на рисунке 1.12, фото 3 были изображены результаты подобной деградации в агропочвах и городских конструктоземах. В главе 2 обсуждались наиболее простые модели этих процессов, использующиеся для оценки деструкционных потерь и эмиссии диоксида углерода при разложении органических веществ почвы. Зная равновесные величины запаса детрита на поверхности почвы (C_p) и интенсивности его ежегодного поступления в виде опада (L), согласно (2.11), можно оценить кинетические константы деструкции органического вещества (ОВ) по простой формуле: $k=L/C_p$. Такая оценка была проведена нами с использованием известных литературных данных по закономерностям поступления и накопления на поверхности почвы детрита в наземных экосистемах разных климатических поясов [Смагин и др., 2011]. Ее выборочные результаты применительно к травянистым и лесным экосистемам приведены на рисунке 4.36-А,Б. Как видно, константы разложения детрита варьируют в травянистых сообществах от 1 до 4 год$^{-1}$, а в лесных – от 0,1 до 4 год$^{-1}$, что соответствует периодам полураспада от 0,2-0,7 лет (травянистые экосистемы) до 0,7-7 лет (лесные сообщества).

По аналогии для поверхностного слоя детрита в виде торфа или торфосмесей, применяющихся при озеленении городских территорий, темпы деструкции могут быть весьма высокими, в особенности для открытых территорий под зелеными газонами. Действительно, визуальные наблюдения показывают, что часто под газонами за год минерализуется 40-50% ОВ торфа и более, что соответствует значениям констант деструкции 0,5-0,8 год$^{-1}$. Моделирование темпов биодеструкции торфа с такими параметрами на основе уравнения (2.12) приведены на рисунке 4.36-В. В более сложном варианте модели учитывалась зависимость константы деструкции от температуры, согласно функции 2.13. температурный режим был оценен по данным круглогодичного мониторинга этого показателя в 0-5см слое почвы (см. рис. 1.8). Для ввода в модель 2.13 переменной температуры в зависимости от времени использовалась сплайн-аппроксимация мониторинговых данных [Глаголев, Смагин,

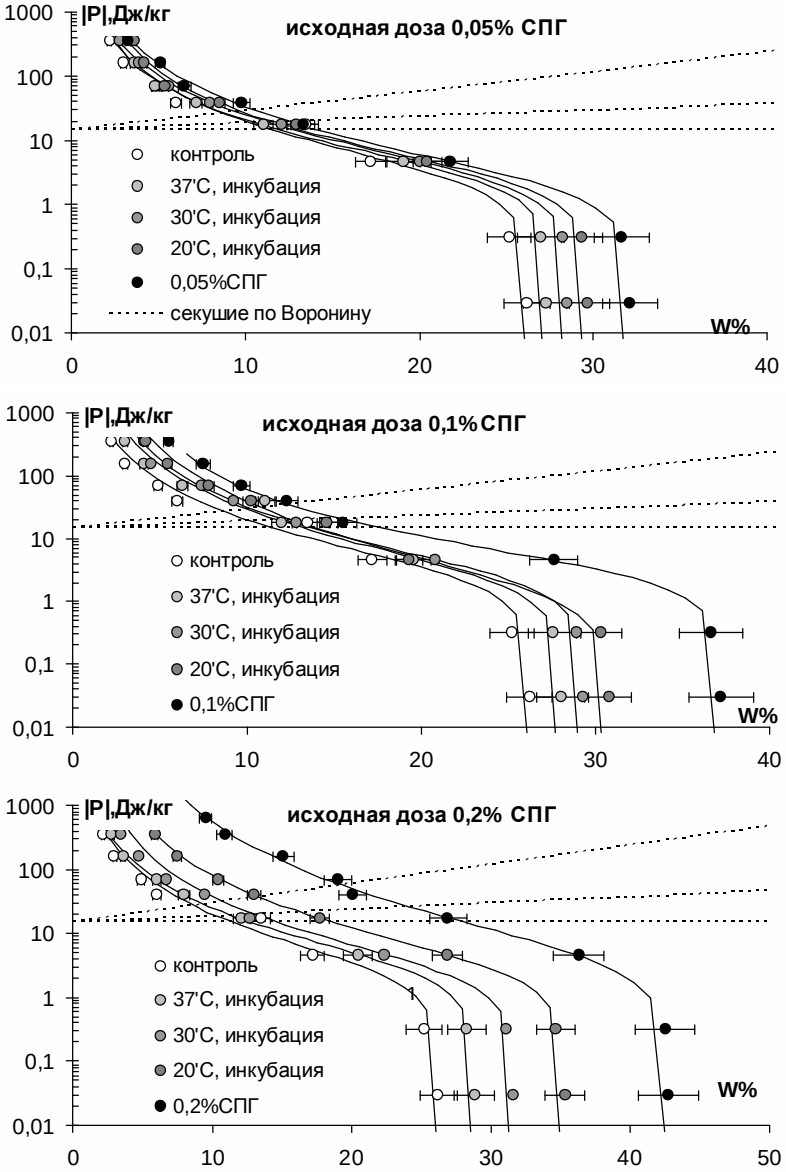


Рис. 4.37. Динамика ОГХ мономинерального кварцевого песка под воздействием разных доз и биодеструкции СПГ (метод равновесного центрифугирования).

2005].Численный расчет темпов деструкции торфа с учетом температурного фактора производился в программе MATLAB-7 посредством решения дифференциального уравнения данного процесса, объединяющего (2.10) и (2.13):

$$\frac{dC}{dt} = -k_m C \cdot Q_{10}^{\frac{(T(t)-T_m)}{10}}, \qquad (4.3)$$

где C – содержание органического вещества, k_m – максимальная константа скорости деструкции в условиях гидротермического оптимума (при $T=T_m$), T(t) – сплайн-функция температуры в зависимости от времени года. На рисунке 4.36-В приведены результаты численного моделирования процесса биодеструкции торфа по модели (4.3) при параметрах k_m = 3,5 год$^{-1}$, T_m= 30^{o}C, Q_{10}=2. В сравнении с аналитической моделью (2.12) тренд динамики характеризуется периодическими ускорениями и замедлениями, соответствующими теплому и холодному времени года и лучше соответствует реальным (экспериментальным) данным. Последние были получены аспирантом ф-та почвоведения МГУ В.И. Васеневым. В целом результаты подтверждают высказанное ранее положении о неустойчивости растительных грунтов на основе торфа, столь распространенных в мегаполисе и составляющих основу традиционных технологий озеленения. Более половины торфяного субстрата успевает разложиться уже в течение первых 1-2 лет, что влечет за собою неминуемую деградацию культурной растительности зеленых насаждений (фото 3) из-за нехватки почвенного ресурса.

Более подробно процесс биодеструкции и физические механизмы, связанные с потерей почвенными смесями водоудерживающей способности был исследован нами для вариантов кондиционирования сильнонабухающими полимерными гидрогелями [Смагин, Садовникова, 2009]. В первом варианте эксперимента тонкозернистый кварцевый песок и его композиции с СПГ в дозах 0,05, 0,1 и 0,2% анализировались на предмет выявления влияния микробного разложения СПГ на динамику и эффективность геля как почвенного кондиционера. Исходное физическое состояние песка и его композиций с гелем было близким к таковому для исследованных ранее образцов (см. § 4.1). Поскольку в данном опыте гель смешивался с песком и далее имел возможность

набухать в широком сосуде (пластмассовый стакан с перфорациями в дне) при небольшой высоте (слой порядка 1см), равновесные влажности на ОГХ и расчетные величины ПВ и КВ здесь закономерно возрастали с увеличением дозы СПГ (рис. 4.37). Так на контроле они были равны 23,8% (КВ) и 26,2% (НВ), при 0,05% СПГ – 29,5-32,1%, при 0,1% СПГ – 33,7-37,2% и при 0,2% СПГ – 4,5-42,7% влаги от массы твердой фазы. То есть прирост влагоемкости в данном диапазоне достигал 1,4-1,7 раза при дозах 0,1-0,2% СПГ. Не менее эффективно было внесение СПГ для повышения наименьшей влагоемкости и ММВ. Значения этих величин варьировали на контроле в диапазоне 8,7-10,3%. При концентрации 0,05% СПГ они возросли до 10,4-12,5%, при 0,1% СПГ – до 12,4-15,3% и при максимальной дозе 0,2% СПГ – до 19,4-24,2%. То есть дозы СПГ 0,1-0,2% увеличивали влагоемкость субстрата в области капиллярной и пленочной влаги в 1,5-2,2 раза, доводя ее до значений, свойственных в природе супесчаным и суглинистым почвам.

Эксперимент еще раз подтвердил, как уже обсуждалось ранее (см. § 4.1), вывод о доступности аккумулированной посредством СПГ пленочной и капиллярной влаги растениям. Величина ВЗ варьировала здесь в пределах от 1,2% (контроль) до 4,3% (0,1% СПГ) и 7,6% (0,2% СПГ), в результате чего диапазон доступной влаги (НВ-ВЗ) закономерно увеличивался от 8,5% до 16,6%, то есть практически вдвое, как и прирост НВ. Изменения в структурной организации субстрата при смешивании с гелем сопровождались небольшим уменьшением эффективного диаметра доминирующих почв, начиная с доз 0,1% (0,04 мм вместо 0,05 на контроле) до 0,023 мм (доза 0,2%). В целом незначительное изменения в спектре пор связаны, по-видимому, с его симметричным расширением как в сторону малых диаметров (тонкие макропоры, мезопоры), соответствующих приросту НВ и ММВ, так и в сторону крупных макропор, отражающих увеличение водовместимости и КВ.

Эксперименты по инкубации образов с гелем в течение 6 месяцев при температурах 20, 30 и 37^{o}С выявили весьма сильную изменчивость физического состояния и водоудерживающей способности, отражаемых ОГХ и

производными от нее показателями (рис. 4.37, 4.39). Наибольшая биодеградация СПГ и соответствующее снижение водоудерживающей способности были выявлены при максимальной температуре инкубации 37°С, наименьшая – при минимальной (20°С). Вариант инкубации при 30°С занимал промежуточное положение. Эти результаты были вполне закономерными, исходя из известного правила Вант-Гоффа, согласно которому интенсивность (био)химических процессов возрастает в 2-3 раза на каждые 10° температуры. Причем максимальная температура (37°С) находилась, по-видимому, в пределах температурного оптимума для группы микроорганизмов, осуществляющих разложение СПГ, потому что в противном случае здесь должно бы наблюдаться снижение интенсивности биодеструкции.

Детализируя результаты эксперимента, отметим, что инкубация при 37°С для всех трех уровней содержания СПГ (0,05, 0,1, 0,2%) привела к близким результирующим характеристикам водоудерживающей способности и структурного состояния, незначительно отличающимся от контроля (рис.4.37). Водовместимость и капиллярная влагоемкость здесь варьировали в пределах 25-29%, ММВ и НВ – в диапазоне 9-12%, а ВЗ – 1,4-1,8% от массы твердой фазы.

Определенная методом Тюрина в модификации Никитина концентрация органического углерода с последующим пересчетом на массу СПГ, показала, что содержание геля в данном варианте опыта упало до 0,036-0,051% при исходных дозах 0,05-0,2% СПГ и температуре инкубации 37°С. По экспоненциальной модели биодеструкции (см. формулу 2.12), такие темпы разложения соответствуют кинетическим константам минерализации 0,7-2,7 год$^{-1}$ или периодам полураспада СПГ $T_{0,5}$ =0,3-1,1 года. Практически полное разложение (95%СПГ) произойдет при таких темпах за 0,4-1,7 года, согласно показателю $T_{0,95}$ по [Смагин и др., 2001]. Очевидно, что при подобных темпах эффект от СПГ в большинстве случаев сходит на нет уже в течение первого года от момента его внесения.

Конечно, круглогодичная температура почвы в 37°С невозможна даже в аридных климатических условиях, однако выявленные темпы биодеструкции могут приводить к весьма

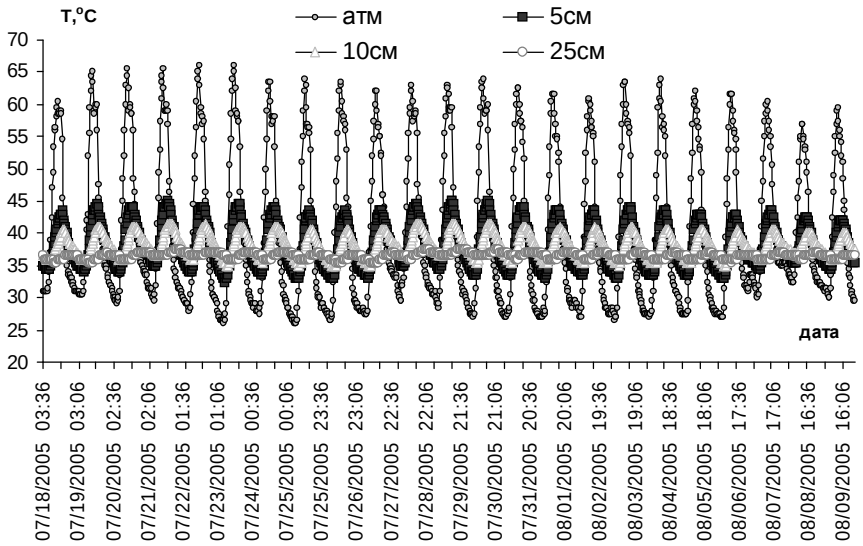


Рис. 4.38. Фрагмент автоматизированного мониторинга температуры почвы на экспериментальной станции в Катаре (датчики «термохрон» серии DS1921G).

серьезному ухудшению водоудерживающей способности почв, кондиционированных СПГ уже в первые 2-3 месяца жаркого вегетационного сезона. Как показывают наши наблюдения за температурой атмосферы и песчаной пустынной почвы на экспериментальной станции Министерства муниципального и сельского хозяйств Катара с помощью программируемых датчиков «термохрон» [Смагин, Садовникова, 2009], в летние месяцы средние температуры почвы в корнеобитаемой толще 0-30см составляют порядка 37-38^{o}C при суточных амплитудах 5-10^{o}C, а в атмосфере – до 40 ^{o}C! (рис. 4.38).

При 30^{o} температуре интенсивность деградации СПГ и физического состояния почвы несколько снижается по сравнению с 37^{o} режимом. К концу инкубационного эксперимента концентрации СПГ составляли 0,045-0,086% в ряду первоначальных доз 0,05-0,2% СПГ, что соответствовало кинетическим константам разложения 0,4-1,7 год$^{-1}$ или периодам полураспада СПГ $T_{0,5}$ = 0,4-1,7 года, а периодам разложения 95% СПГ $T_{0,95}$ = 0,7-2,8 года. В результате

биодеструкции СПГ величины водовместимости и КВ снизились до значений 26-33%, ММВ и НВ до 9,5-13% и ВЗ до 1,3-2,6% в исследуемом диапазоне исходных доз 0,05-0,2% СПГ. Наибольшая стабильность СПГ и, соответственно, его последействие были выявлены в эксперименте с комнатной температурой порядка 20^{o}С. Темпы деструкции гидрогеля, оцененные по экспоненциальной модели здесь характеризовались значениями констант 0,2-1,5 год$^{-1}$ или периодам полураспада СПГ $T_{0,5}$ = 0,5-3,3 года, а периодам разложения 95% СПГ $T_{0,95}$ = 0,7-5,2 года. При этом анализ ОГХ выявил более высокие показатели влагоемкости во всем диапазоне переменных влажности и капиллярно-сорбционного потенциала (рис.4.37). Так КВ и ПВ варьировали в пределах 27-35%, ММВ и НВ составляли значения 10-16%, а ВЗ – 2,8-3,8% для композиций с исходными дозами 0,05-0,2% СПГ после завершения инкубации. В результате для доз 0,1-0,2% к концу эксперимента сохранились статистически достоверные отличия от контроля показателей водоудерживающей способности в 1,3-1,5 раза.

Близкие результаты по влиянию биодеструкции СПГ на физическое состояние кондиционируемого грубодисперсного субстрата были получены для второй серии образцов на базе песчаной полиминеральной почвы Каракумов (ст. Репетек) (рис. 4.39). Как видно, исходные характеристики водоудерживания у этой почвы были несколько выше, чем у кварцевого песка, в особенности для области, близкой к насыщению. Так КВ и ПВ данного субстрата составили 34,2 и 40,4%, ММВ и НВ – 9,4 и 10,9%, ВЗ – 4,5%. Внесение таких же доз СПГ (0,05, 0,1, 0,2%) во влажном состоянии с последующим свободным набуханием привело к закономерному смещению ОГХ вправо относительно контроля с повышением значений потенциалов и равновесной влажности и адекватному смещению эффективного диаметра доминирующих в структуре композиций пор от 0,13 мм для контроля и 0,05% СПГ до 0,09 мм при 0,1% СПГ и 0,03 мм при 0,2% СПГ (рис. 4.39). Малая концентрация (0,05% СПГ) ощутимо повышала капиллярную влагоемкость и водовместимость (до 45-50%) и несколько увеличивала водоудерживание в области капиллярной и пленочной влаги (НВ = 13,3, ММВ=11,2%). Дозы в 0,1-0,2%

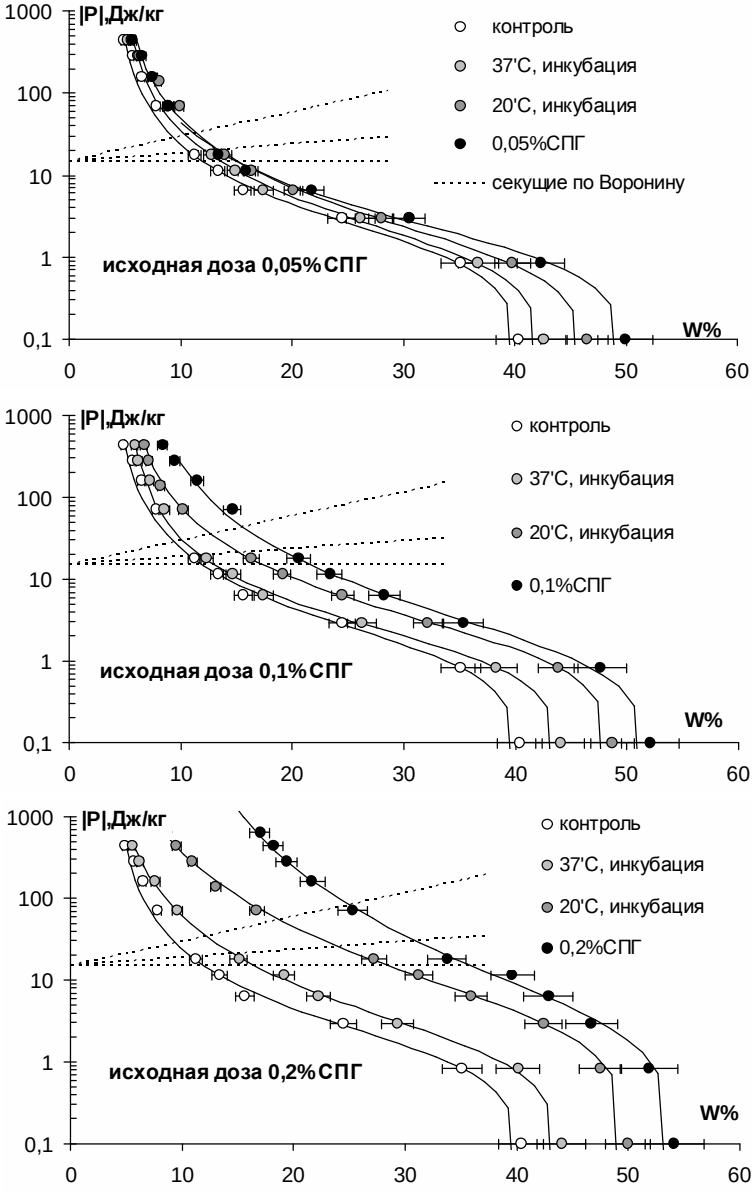


Рис. 4.39. Динамика ОГХ песчаной полиминеральной почвы Каракумов под воздействием разных доз и биодеструкции СПГ (метод равновесного центрифугирования).

СПГ довели капиллярную и полную влагоемкость до 49-54%, а ММВ и НВ до 17-31%, то есть величин, присущих почвам среднего и тяжелого гранулометрического состава. При этом возросла и ВЗ до 7,5-14%, однако более значительный прирост НВ позволил расширить диапазон доступной влаги с 6% на контроле до 11-17% при дозах 0,1-0,2%СПГ. Интегральная энергия водоудерживания также последовательно возрастала от 9 Дж/кг твердой фазы на контроле до 20,6 Дж/кг при 0,1% СПГ и 36 Дж/кг для 0,2% дозы гидрогеля.

По мере биодеструкции СПГ достигнутые первоначально высокие показатели закономерно уменьшались с максимальной интенсивностью при наибольшей температуре инкубации 37^{o}С, как и в рассмотренном ранее случае с кварцевым песком (рис. 4.37, 4.39). Для дозы 0,05% СПГ КВ и ПВ снизились при температуре 37^{o}С до 39 и 43%, а при меньшей температуре 20^{o}С – до 43 и 47%, соответственно. Различий в ММВ и НВ при этом практически не наблюдалось, и обе величины, не зависимо от температуры инкубации, оставались на исходном уровне 11-13%, полученном в свежей композиции с 0,05% дозой СПГ.

Инкубация при более высоком содержании СПГ 0,1% при 37^{o}С привела к снижению ПВ до 44%, КВ до 39%, НВ до 10,8%, а ММВ до 10,2%, что было близким к таковым характеристикам для исходного субстрата без СПГ. При меньшей температуре 20^{o}С остаточные влагоемкости были выше и варьировали от 13-15% для ММВ и НВ до 45-49% для КВ и ПВ.

Наконец, наибольший эффект последействия был выявлен при максимальной исходной дозе СПГ в 0,2%. Здесь при температуре 37^{o}С капиллярная и полная влагоемкости снизились на уровень 41-44%, а ММВ и НВ до значений 12-15%. Инкубация при меньшей температуре 20^{o}С позволила удержать влагоемкость на более высоких отметках – 47-50% для КВ и ПВ и 19-24% для ММВ и НВ. Таким образом, исходное фактически трехкратное повышение водоудерживающей способности почвы, характеризуемое величиной НВ при внесении дозы 0,2% СПГ после инкубации при 20^{o}С снизилось до двукратного.

Темпы биодеструкции СПГ, оцениваемые как и в предыдущем случае по данным о первоначальной дозе и остаточной концентрации геля за вычетом углерода природных

органических веществ (гумуса), характеризовались кинетическими константами разложения 0,7-1,7 год$^{-1}$, периодам полураспада $T_{0,5}$ =0,4-1,0 года и периодам разложения 95% СПГ $T_{0,95}$ =0,7-1,5 года для температуры 37^{o}C. При более низкой температуре 20^{o}C деструкция замедлялась и кинетические константы снижались до уровня 0,4-0,7 год$^{-1}$, что было эквивалентно периодам полураспада $T_{0,5}$ =1-1,6 года и периодам разложения 95% СПГ $T_{0,95}$ =1,5-2,5 года для всех исследованных доз СПГ в диапазоне 0,05-0,2%.

Обобщенная информация двух экспериментов по биодеструкции – с кварцевым песком и полиминеральной песчаной почвой Каракумов позволила выявить зависимость кинетических констант разложения СПГ от температуры (рис. 4.40). На ее основе с использованием данных о естественном ходе почвенных температур в аридных условиях Персидского залива (рис.4.38), и модифицированной экспоненциальной модели биодеструкции:

$$\frac{dC}{dt} = -k(T)\,C\,, \qquad (4.4)$$

где C – содержание гидрогеля, k(T) – зависимость константы биодеструкции от температуры в виде k(T)=0,2834exp(0,0435·T) были осуществлены расчеты потенциального разложения гидрогеля. Температура задавалась как функция от времени T(t) посредством эмпирического уравнения $T(t)=T_0+a\cdot\sin(2\cdot 3{,}14\cdot t/b+c)$, параметры которого a=4,45, b=23,85, c=4,18, T_0=38,14 были получены по реальным данным (рис. 4.38) методом наименьших квадратов в программе S-Plot 2001. Очевидно, что именно температура будет определяющим параметром в случае разложения СПГ, а зависимость биодеструкции от увлажнения можно не учитывать, ведь постоянные поливы будут поддерживать влажность на постоянном уровне, оптимальном для биологических процессов.

Проведенные в системе MATLAB-7 численные расчеты по модели (4.4) показали, что потенциальные потери для 580 часов (менее 1 месяца) составляют 9-10%, а для трехмесячного срока – до 33% от исходного содержания, не зависимо от дозы СПГ (рис.4.41).

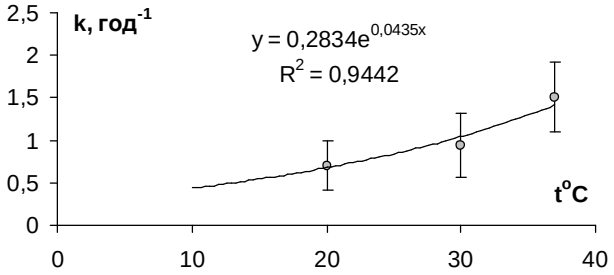


Рис.4.40. Обобщенная зависимость констант скорости биодеструкции СПГ от температуры.

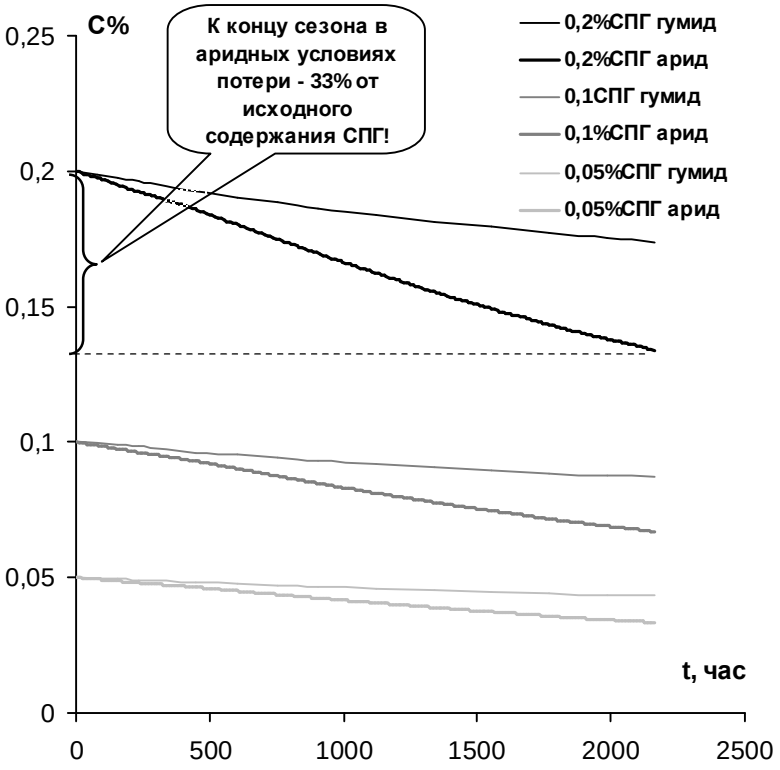


Рис.4.41. Моделирование биодеструкции СПГ в зависимости от температурных условий при оптимальном увлажнении.

Использование температурных данных, характерных для гумидных климатических условий столичного мегаполиса (рис. 1.8) со сплайн-аппроксимацией функции T(t) для ввода в модель (4.4) показало, что в этом случае деструкция геля протекает более замедленно по сравнению с разложением в аридных поливных почвах (рис. 4.41). За вегетационный сезон теряется порядка 10-13% от исходного количества (дозы) СПГ. Однако и такие темпы являются весьма интенсивными с технологической точки зрения. Таким образом, биодеградация СПГ как влагонасыщенного, обогащенного углеродом и азотом органического вещества является одним из наиболее серьезных факторов, снижающих его эффективность в производственных условиях. Аналогичный вывод можно сделать и для органогенных природных почвомодификаторах. Поэтому в проектах почвенных конструкций наряду с определением технологических параметров при помощи моделирования потребления и транспорта влаги и питательных веществ должны быть в обязательном порядке учтены негативные воздействия на почвенные материалы и в первую очередь – их микробная деструкция. И в следующей главе тема моделирования биодеструкции будет продолжена в связи с технологической задачей повышения устойчивости почвенных конструкций.

ГЛАВА 5. Технологическое моделирование и экспериментальные исследования для разработки параметров слоистых почвенных конструкций.

5.1. Поливариантные расчеты почвенных режимов с помощью модели «HYDRUS-1D» при проектировании влагоаккумулятивных почвенных конструкций с защитными экранами.

Суть проектирования почвенных конструкций с использованием компьютерных моделей энергомассопереноса в почвах заключается в следующем. Для расчетной почвенной толщи, которая в большинстве случаев не превышает 1м (в городских почвах – нормативная величина, согласно закону г. Москвы «О почвах» от 04.07.2007 № 31) проводится поливариантный прогноз поведения влаги и водопотребления растительностью данного типа в исходном состоянии и после внесения тех или иных доз почвомодификаторов с формированием одного или нескольких аккумулятивных слоев на различных отметках от поверхности. Для богарных (неполивных) условий оптимальным является вариант, в котором при минимальных количествах почвомодификаторов удается создать необходимый для обеспечения транспирационных затрат и, следовательно, продуктивности растений запас влаги с питательными веществами на наиболее вероятный период без осадков в засушливые годы. Вторая задача, актуальная как для аридных условий, так и для современных мегаполисов умеренного климата с техногенным загрязнением и засолением почв – обеспечение защиты корнеобитаемой толщи от этих негативных факторов с блокировкой основного механизма концентрирования водорастворимых поллютантов и солей у поверхности – восходящих капиллярных токов. С этой целью в наших технологиях предлагается подстилание корнеобитаемой толщи (растительного слоя) грубодисперсными экранами из щебня, керамзита и тому подобных материалов [Смагин, 2006, Смагин и др., 2008]. Поскольку в почвенно-гидрофизических моделях не

заложена непосредственная возможность имитации внедрения подобного экрана в почвенную толщу из-за отсутствия у его материалов водоудерживающей способности и, соответственно ОГХ, при моделировании можно применить вариант отсечения почвенной толщи (укорачивания профиля) с использованием нижнего граничного условия свободного гравитационного оттока влаги типа Seepage Face (см. главу 2). При этом для сплошных почвенных конструкций под травянистой растительностью (газоны, цветники) следует учитывать выявленную нами в аналогичных естественных почвах зависимость продуктивности от доступного эдафического ресурса (рис. 1.15). По ней минимальная мощность, обуславливающая устойчивое продуктивное функционирование травянистых фитоценозов составляет 40-50см. Значит, в вариантах прогнозных расчетов влагообеспеченности с помощью почвенно-гидрофизических моделей для конструктоземов с защитными грубодисперсными экранами можно задавать мощность профиля порядка 40-50 см с использованием вышеупомянутого условия свободного оттока влаги на нижней границе. В этой толще имитируется размещение слоев почвомодификаторов разной мощности с заранее определенными характеристиками водоудерживания (ОГХ) и влагопроводности ($К_ф$), причем с поверхности необходимо их экранирование минеральным слоем определенного размера, чтобы обеспечить достаточное снижение биодеструкции (см. далее). Верхнее граничное условие при проектировании подобных слоистых конструкций задается в виде потенциальной транспирации, характерной для данного вида зеленых насаждений, при оптимальной водообеспеченности в зависимости от температуры (рис. 4.34). Для травянистых культур газонов в условиях засушливых периодов г. Москвы эта величина составляет порядка 3-4 мм/сут (см. § 4.3). Для имитации корневого потребления в модели HYDRUS-1D задается плотность распределения корней по исследуемой почвенной толще, а также выбирается из базы данных тип растительности со своей спецификой реакции потребления влаги на ее недостаток и солевой (осмотический) стресс. В поливариантных расчетах анализируется динамика влажности по профилю и запасов влаги в сравнении с

требованиями растений, а также кумулятивные характеристики непродуктивных потерь (капиллярно-гравитационного сброса) влаги из расчетной толщи и затрат на реальную эвапотранспирацию с учетом снижения транспирационных расходов при иссушении почвы. Рассмотрим предложенный подход к проектированию на конкретных примерах.

Перед началом ***имитационного моделирования*** необходимо получить экспериментальные характеристики вмещающих субстратов, почвомодификаторов и их композиций в виде ОГХ и функций влагопроводности (в простейшем случае – коэффициентов фильтрации). Эти характеристики и методические разработки по их получению были проанализированы детально в предшествующих главах №№ 2,4. Все экспериментально полученные ОГХ (см. § 4.1) были аппроксимированы стандартной функцией ван-Генухтена, адекватно описывающей реальные данные в широком диапазоне определяемых переменных содержания и абсолютных значений давления (потенциала) почвенной влаги от 0 до 6000 Дж/кг. Ниже приводятся непосредственно использованные в модельных расчетах данного раздела основные гидрофизические характеристики кварцевого мономинерального тонкозернистого песка (вмещающий субстрат), органогенного торфосапропелевого почвомодификатора «Arid Grow» и 0,2% композиции с песком сильнонабухающего полимерного гидрогеля (СПГ) в виде радиационносшитого полиакриламида с ионогенными группами (рис. 5.1). Экспериментальные данные были получены методом равновесного центрифугирования (см. главу 2); для варианта кварцевого песка также использовалась информация о равновесном распределении влажности в высокой (50см) колонне после гравитационного оттока. Для ввода в модель экспериментальные данные были аппроксимированы функцией ван-Генухтена (сплошные линии на рис. 5.1) с использованием подпрограммы RETC, входящей в информационное обеспечение пакета HYDRUS-1D. Функция в обозначениях, принятых в используемых моделях имеет вид:

$$\Theta = \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{\left[(1+(\alpha P)^n\right]^{-m}} + \Theta_r; \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \qquad (5.1)$$

где P,[см.вд.ст.], Θ,[см^3/см^3], – капиллярно-сорбционное

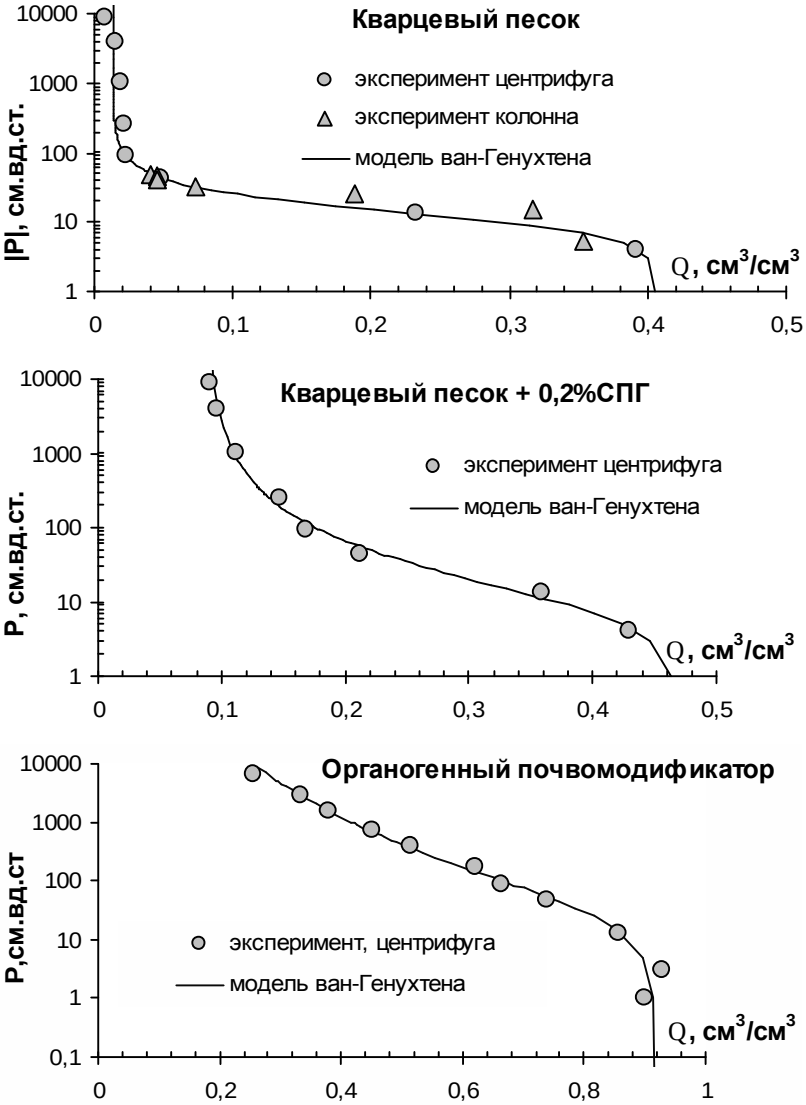


Рис. 5.1. Примеры основных гидрофизических характеристик некоторых материалов слоистых почвенных конструкций и их аппроксимации функцией ван-Генухтена.

Таблица 4.1. Почвенно-гидрофизические параметры компонентов конструктоземов для модели HYDRUS-1D

Почвенные материалы	Q_s, **см^3/см^3**	Q_r, **см^3/см^3**	a, **см$^{-1}$**	**n**	$К_ф$, **см/сут**
кв. песок, метод ц/ф	0,013	0,406	0,087	2,787	190-480
кв. песок, метод колонн	0,024	0,352	0,042	5,682	190-480
кв. песок+0,2% СПГ метод ц/ф	0,088	0,468	0,111	1,604	1,5-2,9
почвомодификатор «Arid Grow»	0,916	0,002	0,038	1,217	480

давление и объемное содержание влаги в почве (переменные ОГХ), Θ_s, Θ_r – параметры влагоемкости почвы при максимальном (состояние насыщения) и минимально допустимом (остаточном) содержании влаги, α, n – константы аппроксимации, варьирующие от физических свойств почвенных материалов (дисперсности, структуры, содержания органических веществ и т.д.). Сравнивая (5.1) и (2.2) (см. главу.2), убеждаемся, что это обратные функции с точностью до обозначений и с учетом равенства $\alpha=1/\psi_e$. Все параметры Θ_s, Θ_r α, n определяются методом наименьших квадратов при аппроксимации экспериментальных данных ОГХ функцией (5.1). Для исследуемых компонентов почвенных конструкций параметры аппроксимации ОГХ, а также значения их эффективных коэффициентов фильтрации приведены в таблице 4.1.

Рассмотрим результаты предварительных поливариантных численных экспериментов с моделью для отработки элементов проектируемых конструкций. Так исходный субстрат (аналог аллювиальных отложений р. Москвы) обладал низким водоудерживанием и, соответственно биопродукционным потенциалом. На рисунке 5.2 показана динамика влажности такого почвогрунта при свободном гравитационном оттоке (сбросе) влаги и нулевом испарении с поверхности. Имитируется ситуация водоудерживания после сплошного промачивания почвы сильными осадками или талыми водами. Как видно уже в течение первых суток

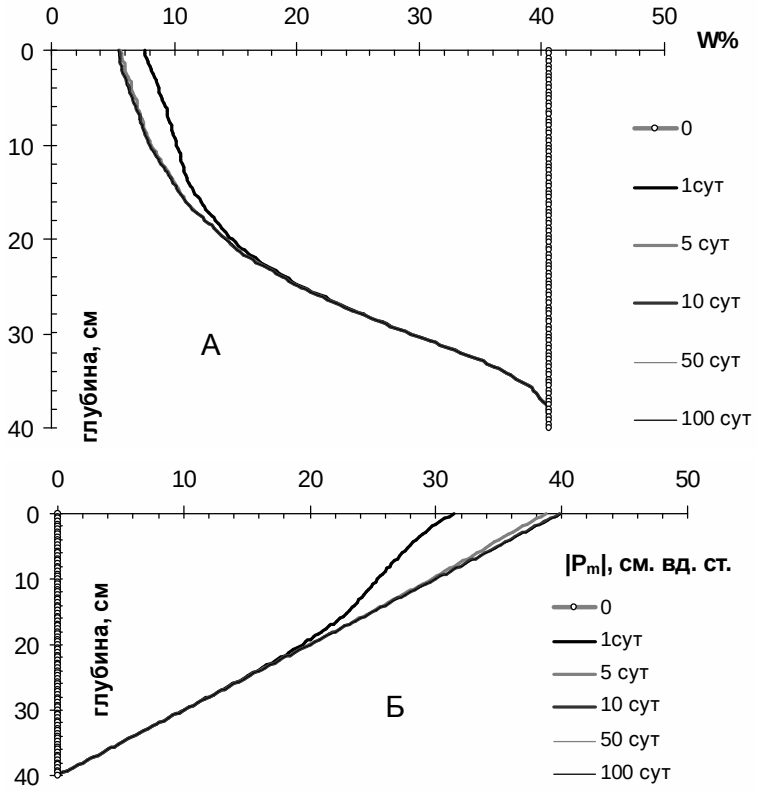


Рис. 5.2. Моделирование режима влажности в песчаном почвогрунте конструктозема со щебнистым экраном на глубине 40см при свободном гравитационном стекании (А – весовая влажность, Б –капиллярно-сорбционное давление влаги).

устанавливается равновесие между капиллярно-сорбционными силами, удерживающими воду и силой тяжести, стремящейся ее удалить, диагностируемое выходом на прямую зависимости давления влаги от глубины почвы (рис. 5.2-Б). В результате равновесное распределение влаги повторяет ОГХ и для песчаного субстрата основное количество удаляется за пределы 0-20см корнеобитаемой зоны «зависая» на нижней границе подстилания грубодисперсным экраном из щебня (эффект

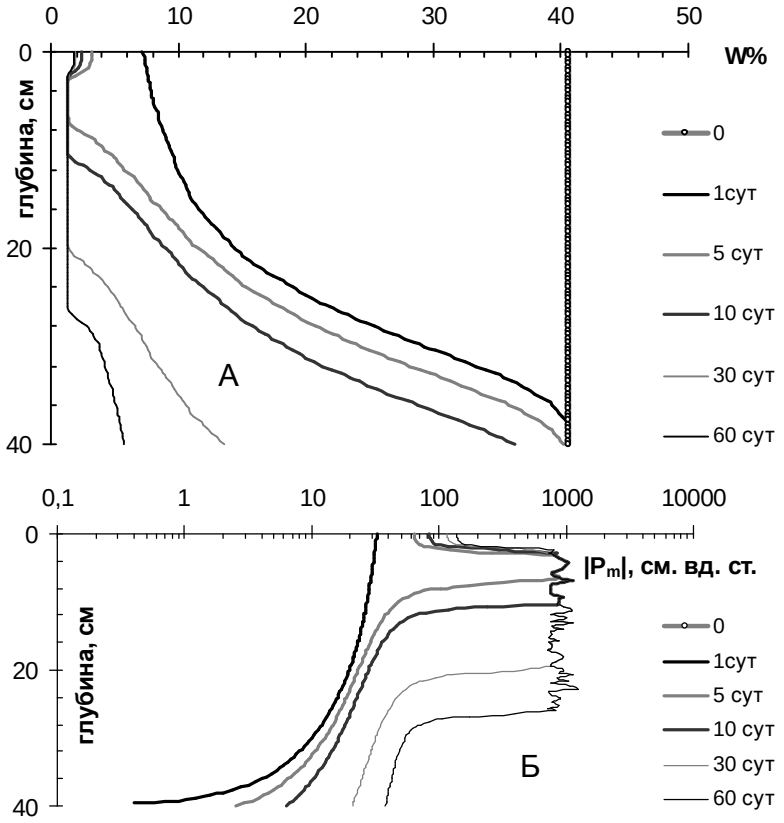


Рис. 5.3. Моделирование режима влажности в песчаном почвогрунте конструктозема со щебнистым экраном при влагопотреблении газонной растительностью после насыщения влагой. (А – весовая влажность, Б –капиллярно-сорбционное давление влаги).

«антидренажа» по [Смагин и др., 2008]). Равновесный запас влаги (интеграл распределения 5.2-А с учетом средней плотности почвы 1,4 г/см^3) в верхнем 0-20см слое составляет порядка 17мм, а во всем профиле конструктозема – 75мм.

«Подключим» потребление влаги газоном с интенсивностью потенциальной транспирации 4мм/сут. Распределение корней задано постепенно убывающим в соответствии с их ростом на однородном субстрате. С каждым днем количество влаги

неуклонно падает, и уже в течение первой декады верхний слой иссушается до величин влажности менее 2%, соответствующих состоянию устойчивого завядания растений. Это подтверждается другим модельным показателем – динамикой водопотребления растительностью газона наряду с темпами гравитационного оттока влаги (рис. 5.4). Как видно гравитационный сброс прекращается уже в течение первых суток, а вот транспирационное потребление вначале находится на заданном уровне потенциально возможных величин порядка 4мм, а потом стремительно падает, поскольку растения начинают снижать скорость транспирации, испытывая недостаток доступной корням влаги. Уже за 8-10 дней транспирационный расход снижается вдвое, а через месяц приближается к нулевым отметкам, означая полную гибель насаждения. В реальности такая ситуация нередка для городских газонов, как уже обсуждалось в главе №1, и при отсутствии дождей или специальных поливов в течение месяца летних засух на фоне шаблонного сенокошения этот тип растительности гибнет на корню из-за недостатка влаги (фото 1-4 Приложения).

Посмотрим, как повлияет на ситуацию внесение органогенного торфяного почвомодификатора при небольшой мощности слоя порядка 4см с экранированием его от поверхности 2см песка (рис. 5.5). Распределение влаги после свободного оттока изменилось и по сравнению с вариантом чистого песка часть воды удалось задержать в приповерхностном слое конструкции. Равновесные запасы влаги возросли при этом во всем конструктоземе ~ в 1,4 раза, а в поверхностном корнеобитаемом горизонте 0-20см – в 2,8 раза. Это в свою очередь означает более хорошую приживаемость газона, особенно при его посадке семенами, а также некоторое увеличение продуктивности и устойчивости к недостатку влаги в периоды отсутствия осадков.

Если слой почвомодификатора увеличить до 10 см и перекрыть его во избежание деструкции 5см слоем исходного песчаного субстрата, запасы подвешенной влаги в конструктоземе удается увеличить до 150 мм, а в верхней 20 см толще до 90мм. Это означает ~ двукратный и пятикратный прирост по сравнению с аналогичными характеристиками в

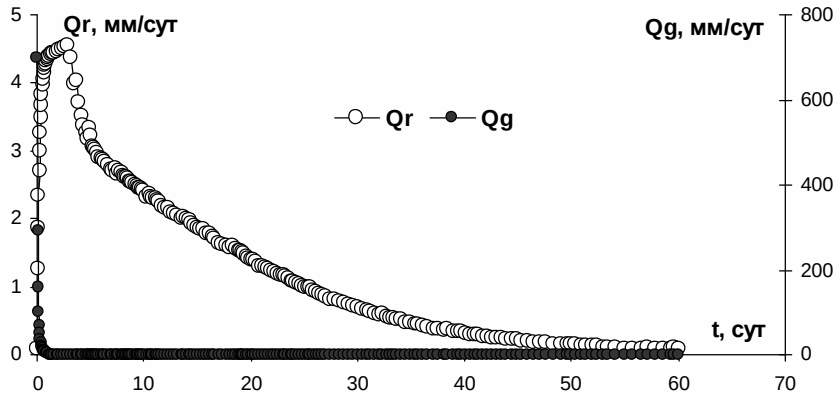


Рис. 5.4. Моделирование гравитационного оттока с нижней границы (Qg) и поглощения влаги травостоем газона (Qr) из песчаного почвогрунта конструктозема с щебнистым экраном.

исходном варианте с чистым песком. При корневом потреблении с характерной величиной потенциальной транспирации порядка 4мм/сут этих запасов вполне хватает на 20 дневный период роста газона без дополнительных осадков и поливов. Как видно из рисунков 5.6, 5.7, иллюстрирующих подобный сценарий моделирования, лишь по прошествии 20-30 суток слой влагопоглотителя иссушается до значений влажности около 20%, близкой к влаге завядания, а давление почвенной влаги становится при этом порядка 10-12 атм (10-12 тыс. см.вд.ст), то есть подходит к формальному пределу в 15атм, характеризующему в почвенной гидрофизике состояние устойчивого завядания многих растений [Шеин, 2005]. Интенсивность непродуктивных потерь в виде гравитационного оттока в такой слоистой конструкции падает на порядок раз по сравнению с исходным вариантом (рис. 5.4). В результате повышенной аккумуляции влаги и растворенных питательных веществ газон на такой конструкции активно транспирирует с интенсивностью 3,5-4,5 мм/сут, близкой к потенциальной величине, обеспечивая устойчиво высокий прирост фитомассы в течение почти двух декад без осадков и дополнительных поливов.

Заметим, что в действующих в столичном мегаполисе

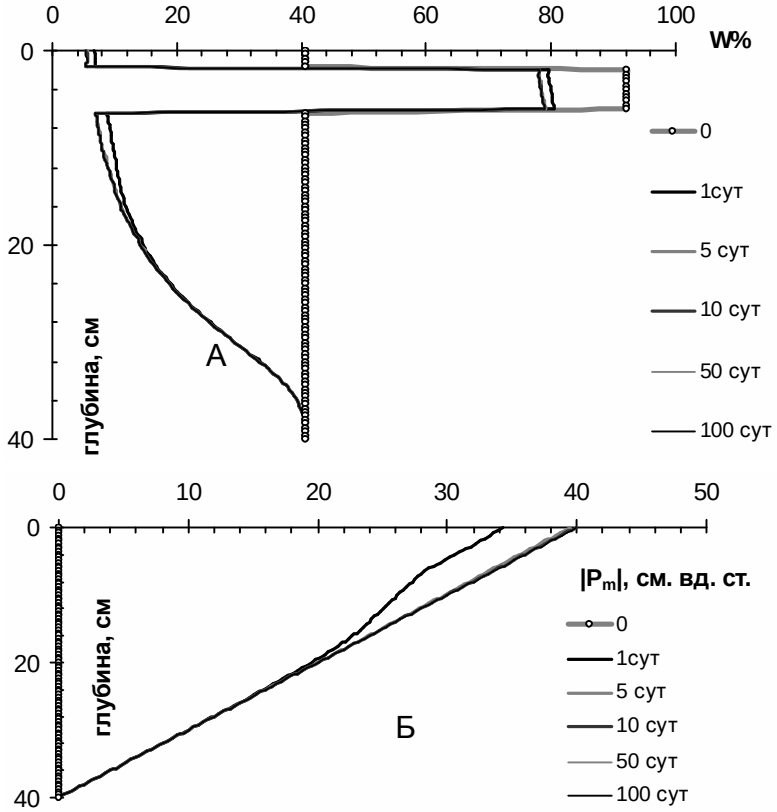


Рис. 5.5. Моделирование режима влажности в конструктоземе с аккумлятивным 4см слоем органогенного почвомодификатора и щебнистым экраном на глубине 40см.

нормативах и правилах по озеленению и комплексному благоустройству городских территорий (Постановления №743-ПП и № 623-ПП) культурный слой «растительной земли» (аналог нашего «аккумулятивного слоя» конструктозема) должен быть не менее 20см, то есть вдвое большим, чем слой почвомодификатора в рассмотренном выше примере. Несмотря на малую реалистичность в формировании подобных слоев на практике из-за традиционной для ЖКХ экономии средств на подготовку почв под озеленение, конструктоземы с аккумулятивными горизонтами такой и даже большей

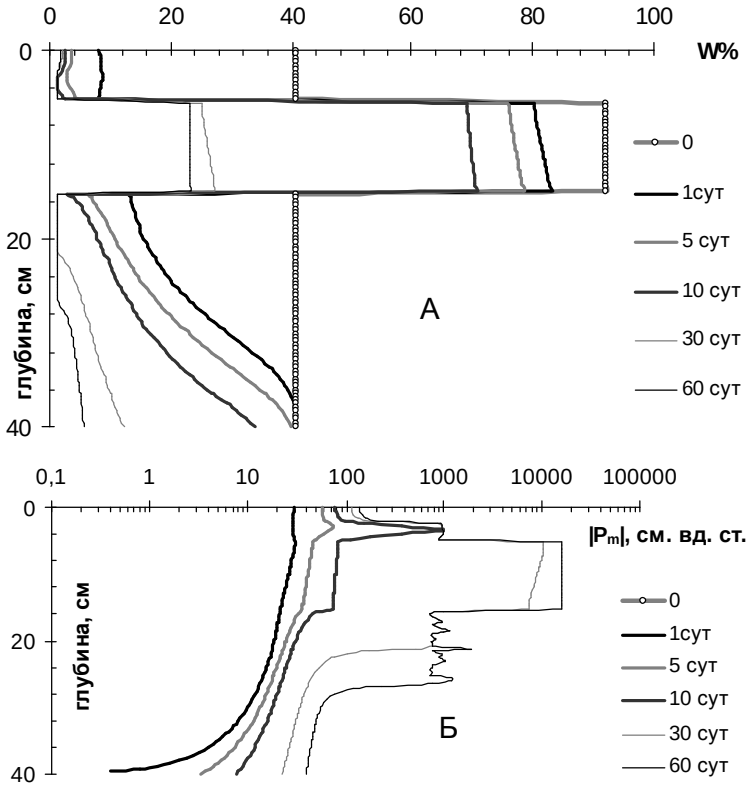


Рис. 5.6. Моделирование режима влажности в конструктоземе с 10 см аккумулятивным слоем почвомодификатора при влагопотреблении газонной растительностью после насыщения влагой.

мощности все же могут создаваться на отдельных особо ответственных объектах, включая спортивные газоны. Поэтому в заключительном примере раздела проанализируем качество и режимы функционирования сплошных почвенных конструкций с аккумулятивными слоями повышенной мощности (рис. 5.8, 5.9). Вместо закладки одного слоя, здесь эффективно разделить количество органогенного почвомодификатора пополам (или в иной пропорции) и расположить его двумя горизонтами, переслаивая исходным почвогрунтом. Такая конструкция сведет

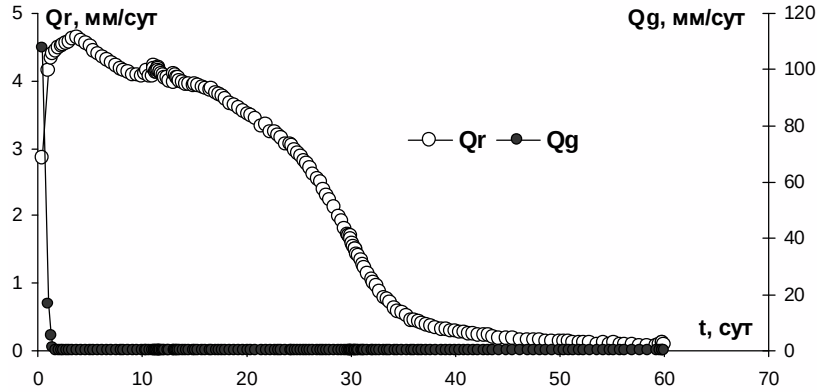


Рис. 5.7. Моделирование гравитационного оттока с нижней границы (Qg) и поглощения влаги травостоем газона (Qr) из конструктозема с 10 см аккумулятивным слоем почвомодификатора.

к минимуму непродуктивный гравитационный отток влаги за пределы 40см толщи, отсеченной щебнистым экраном, и позволит сосредоточить в ней в равновесном состоянии практически втрое больше влаги по сравнению с гомогенным песчаным аналогом. Запасы в верхних слоях конструкции увеличатся в ~7 раз. Этого количества, как показывают результаты компьютерного моделирования, вполне хватит для поддержания устойчивого роста и развития газона на протяжении практически целого месяца без дополнительного поступления влаги. То есть после естественной влагозарядки подобной конструкции по весне талыми водами и ливневыми осадками и (или) после специальных мощных одноразовых поливах, газоны смогут спокойно пережить наиболее вероятный засушливый период начала лета, длительность которого в условиях столичного мегаполиса не превышает 20-30 дней (рис. 1.3, глава 1). Транспирирующая способность газона при этом будет сохраняться на уровне, близком к потенциальному ~ 4мм/сут (рис.5.9), что в свою очередь гарантирует его высокую продуктивность и отличные эстетические качества. Удаление органогенного почвомодификатора от поверхности на глубины 5-15см (основной верхний слой) и 20-30см (дополнительный

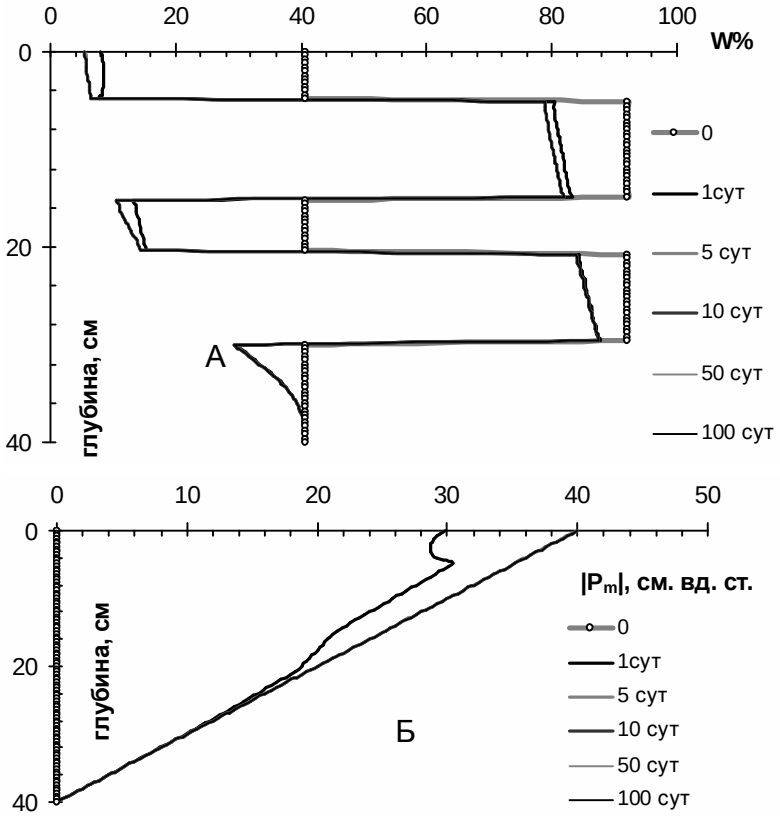


Рис. 5.8. Моделирование режима влажности в конструктоземе с двумя 10 см аккумулятивными слоями почвомодификатора и щебнистым экраном при свободном гравитационном оттоке после насыщения влагой.

нижний) будет способствовать его консервации на 10-15 летний срок и более (см далее). Наличие щебнистого экрана в основании профиля надежно защитит конструкцию от техногенного засоления и загрязнения, поскольку периодически поступающие на поверхность вредные водорастворимые вещества будут удаляться в экран с током влаги, а их возврат и концентрирование у поверхности будут блокированы разрушением капиллярной сплошности. Аналогичные результаты технологического моделирования получены и при

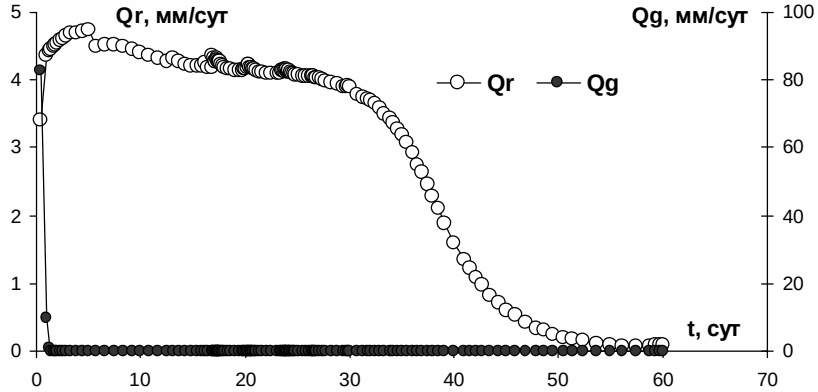


Рис. 5.9. Моделирование гравитационного оттока с нижней границы (Qg) и поглощения влаги травостоем газона (Qr) из конструктозема с аккумулятивными слоями почвомодификатора общей мощности 20см.

использовании синтетических почвомодификаторов в виде СПГ, поэтому здесь они не приводятся, а эта информация рассматриваются в заключительном разделе главы при сопоставлении модельных (прогнозных) и реальных данных функционирования макетов почвенных конструкций малого размера на основе природных и синтетических биополимеров. Более детальный анализ дан в нашей недавно опубликованной монографии, посвященной использованию именно этого класса синтетических почвенных кондиционеров в целях конструирования почв [Смагин, Садовникова, 2009].

Метод имитационного моделирования в среде HYDRUS-1D был применен также для выявления роли ***лесной подстилки*** в аккумуляции влаги и обеспечении водопотребления растительности сосновых экосистем на почвах легкого гранулометрического состава. [Смагин,2011]. Для обеспечения модели в ходе экспериментов методом равновесного центрифугирования были получены основные гидрофизические характеристики образцов подстилки и минеральных горизонтов дерново-подзолистых песчаных почв. Сценарий моделирования был близок к рассмотренным выше примерам с торфяным почвомодификатором, с тем лишь отличием, что подстилка находилась на поверхности минеральной почвы. Заметим, что

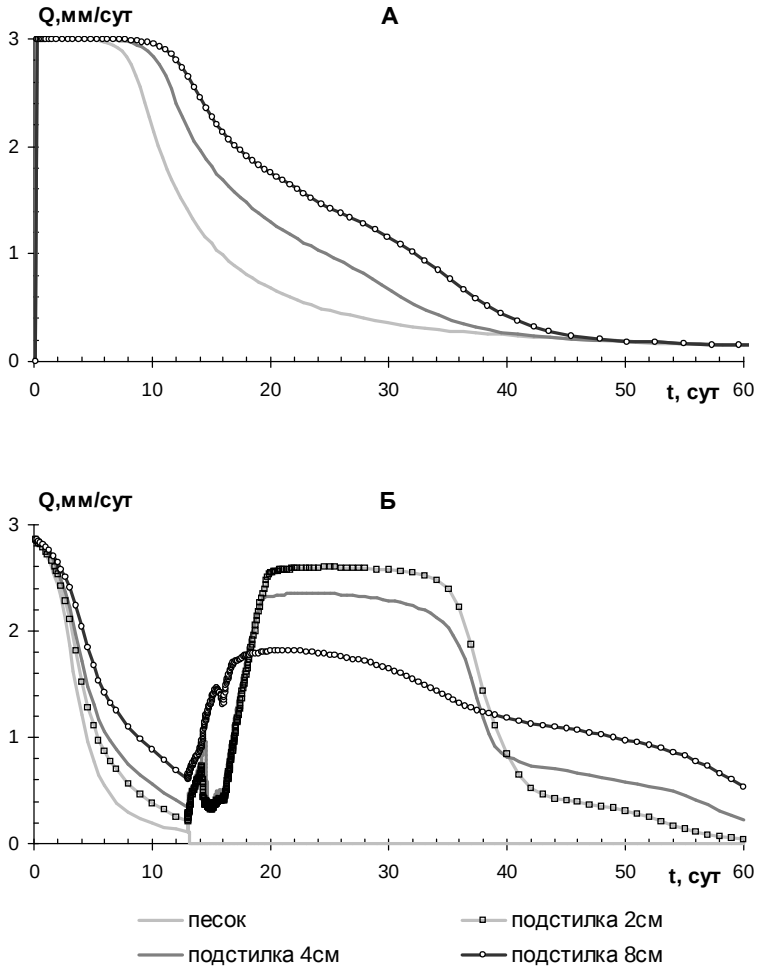


Рис.5.10. Моделирование влияния лесной подстилки на интенсивность корневого потребления влаги: А – режим гравитационного оттока из водонасыщенной почвы, Б – режим периодического поступления осадков в иссушенную почву.

такое расположение органогенного слоя, присущее природным лесным объектам, напоминает обсуждаемую ранее технологию подготовки городских почв к озеленению с подсыпкой торфа на их поверхность. Поэтому результаты моделирования помогают

понять причины эффективности этой доминирующей в мегаполисе технологии в первый год создания зеленых насаждений.

Обратимся к рис. 5.10-А, иллюстрирующему интенсивность корневого потребления, и по сути – пропорциональную ему продуктивность фитоценоза. Как видно исходных запасов влаги после снеготаяния хватает на 7-8 суток потенциального водопотребления с заданной транспирацией 3мм/сут, после чего корневое поглощение начинает резко снижаться, а растения – испытывать угнетение роста из-за недостатка влаги. Слой подстилки в 4 см увеличивает длительность периода потенциального водопотребления до 10-11 суток, а при 8 см горизонте L эта величина возрастает до 13-14 суток. Падение интенсивности водопотребления при наличии подстилки более плавное, чем в случае чистого песка. Так выход на уровень малой транспирирующей способности в 1мм/сут в песке осуществляется на 15-16 сутки, в почве с 4 см слоем детрита – на 23-24 сутки, а с 8 см слоем – на 30-32 сутки, то есть срок вдвое больший, чем в случае минеральной песчаной почвы без подстилки. Соответственно этому увеличивается и период существования растений до стадии необратимого завядания вплоть до 30 дней и более. В умеренно-климатических условиях южной тайги вероятность столь длительного периода без осадков в конце весны - начале лета крайне мала, а менее значительную засуху при наличии слоя подстилки смогут пережить даже ювенильные формы растений с неглубокой корневой системой.

Второй исследуемый сценарий моделирования водного режима соответствует ситуации периодических дождевых осадков с впитыванием влаги в достаточно сильно иссушенную (до -1атм капиллярно-сорбционного давления влаги) почву с подстилкой и без. Тем самым имитируется нередкое для рассматриваемых климатических условий явление периодического дефицита влаги. Потенциальное водопотребление растений задается, как и в предыдущем случае, величиной невысокого транспирационного расхода 3мм/сут. Осадки объемом 60мм выпадают импульсом: на 14 день – 10мм, на 15 день – 40мм и на 16 – 10мм. Физическое испарение влаги с поверхности во всех численных экспериментах принято

нулевым. Это вполне реалистично для рассматриваемого класса грубодисперсных почв, где по прошествии нескольких дней после увлажнения физическое испарение резко падает до очень незначительных величин, поскольку пересыхает верхний слой почвы, а из глубины вода не может подниматься к поверхности из-за отсутствия тонких капилляров и низкой гидравлической проводимости.

Анализ результатов данного численного эксперимента показал, что, как и в предыдущем случае, здесь весьма рельефно проявилась исследуемая гидрологическая роль лесной подстилки (рис. 5.10-Б). Действительно, в варианте чистого песка водопотребление резко падает в течение недели, а на 12-13 сутки растительность необратимо увядает (гибнет) от недостатка влаги, так что интенсивные дождевые осадки в середине месяца уже не способны вернуть их к жизни. Вместе с тем даже небольшой 2см слой подстилки спасает положение и позволяет фитоценозу пережить неблагоприятный период засухи. Осадки возвращают интенсивность корневого водопотребления на уровень близкий к потенциальному и их хватает на поддержание стабильной транспирационной, а, следовательно, и фотосинтетической активности в течение 20-25 дней. По прошествии этого срока корневое потребление вновь падает, и к концу второго месяца (60 сут) растительность увядает от недостатка влаги. При более высоких мощностях подстилки в 4 и 8 см, транспирационную активность удается сохранить на больший срок, хотя при этом снижаются абсолютные величины водопотребления. Так на 60-е сутки эксперимента интенсивность корневого поглощения в варианте с 2 см слоем подстилки упала практически до нуля (0,04мм/сут), при 4 см мощности горизонта L – снизилась до 0,22 мм/сут, а при 8 см – до 0,53 мм/сут. То есть, чем мощнее слой напочвенного детрита, тем больше вероятность для растительности пережить длительные неблагоприятные условия окружающей среды в виде засухи.

В целом проведенный анализ с использованием метода математического моделирования позволяет констатировать значительный вклад лесной подстилки в формирование водоудерживающей способности почв легкого гранулометрического состава и в обеспечение растений

доступной влагой. Подстилка задерживает в верхней корнеобитаемой зоне дополнительное количество влаги атмосферных осадков, стекающих в почву, что в свою очередь позволяет лесной растительности переживать неблагоприятные периоды засухи в 15-20 дней и более. Наряду с аккумуляцией влаги в подстилке сосредотачивается необходимый запас биофильных элементов, вовлекающихся в биокруговорот по мере деструкции детрита. Таким образом подстилка является неотъемлемым функциональным компонентом хвойных лесов на почвах легкого гранулометрического состава, и ее случайное или направленное уничтожение (пожары, трелевка древесины, рекреационная нагрузка, сбор опада в лесопарках) может быть причиной деградации и даже гибели подобных экосистем. Сравнивая результаты моделирования гидрологической функции лесной подстилки на легких почвах с полученными ранее данными об оптимизации водоудерживания конструктоземов с помощью слоев органогенных почвомодификаторов, можно убедиться в их сходности. Основное отличие состоит в локализации влагоемкого органогенного материала. Для подстилки и реплантоземов с подсыпкой торфа в качестве растительного материала это всегда поверхностный горизонт, для предложенных в наших исследованиях слоистых почвенных конструкций – один или несколько органогенных слоев помещаются в минеральный субстрат на расчетную глубину, что позволяет сохранить их от быстрой микробной деструкции. Способы оценки такой глубины будут изложены отдельно (см. далее § 5.3).

Отметим, что приведенные выше примеры касались почвогрунтов с исходно легким гранулометрическим составом и отсутствием (малым количеством) естественных биополимеров в их составе в виде гумуса. Для суглинистых и глинистых почв с удовлетворительной агрегированностью, воздухо- и водопроницаемостью, в принципе можно вообще не вносить каких либо специальных почвомодификаторов-влагопоглотителей в виде слоев и ограничиться лишь прокладкой грубодисперсного экрана на глубине ~40-50см, защищающего почвенную толщу от техногенного засоления и загрязнения. Вместе с тем здесь будут эффективны периодическое внесение органических удобрений (компостов) с

перемешиванием в верхней толще, а также пескование газона, поскольку слой песка не только замедлит биодеструкцию органических веществ, но и снизит расходы на непродуктивное физическое испарение влаги, значительно большее в таких почвах по сравнению с грубодисперсными и торфяными аналогами.

5.2. Упрощенный метод номограмм для определения гидрофизических параметров слоистых почвенных конструкций.

Использование современных компьютерных моделей энергомассопереноса в сложных пространственно-распределенных неоднородных пористых средах для выявления параметров почвенных конструкций и режимов их функционирования следует признать наиболее правильным и точным методом проектирования. Для ориентировочных (грубых) расчетов можно использовать также упрощенный ***метод номограмм***, позволяющий производить оценку равновесных запасов влаги в почвенно-грунтовой толще известной мощности (Н) в зависимости от дисперсности (гранулометрического состава) и генезиса почвенного материала. Для научного обоснования этого метода в исследовании была задействована авторская база данных ОГХ минеральных и органогенных почв разного генезиса и дисперсности [Смагин, 2003]. После статистической обработки результатов было выделено 7 классов почвогрунтов (пески, супеси, легкие суглинки, средние и тяжелые суглинки, тяжелые суглинки и глины, лесные подстилки, торфа), среднестатистические ОГХ которых значимо отличались друг от друга. Эти ОГХ были аппроксимированы функцией ван-Генухтена (2.2). Далее при помощи численного интегрирования каждой из ОГХ с предварительным переводом весовой влажности (W) в объемную ($\theta=W\rho_b$, где ρ_b – плотность почвы) и единиц давления из кПа в см.вд.ст. (101,3 кПа=1030 см.вд.ст.) был определен запас влаги в зависимости от мощности профиля конструктозема (Н): $ЗВ_{ММ} = \int_0^H \Theta dP/10$, где Θ – объемная влажность в %, Р – давление почвенной влаги в см.вд.ст.

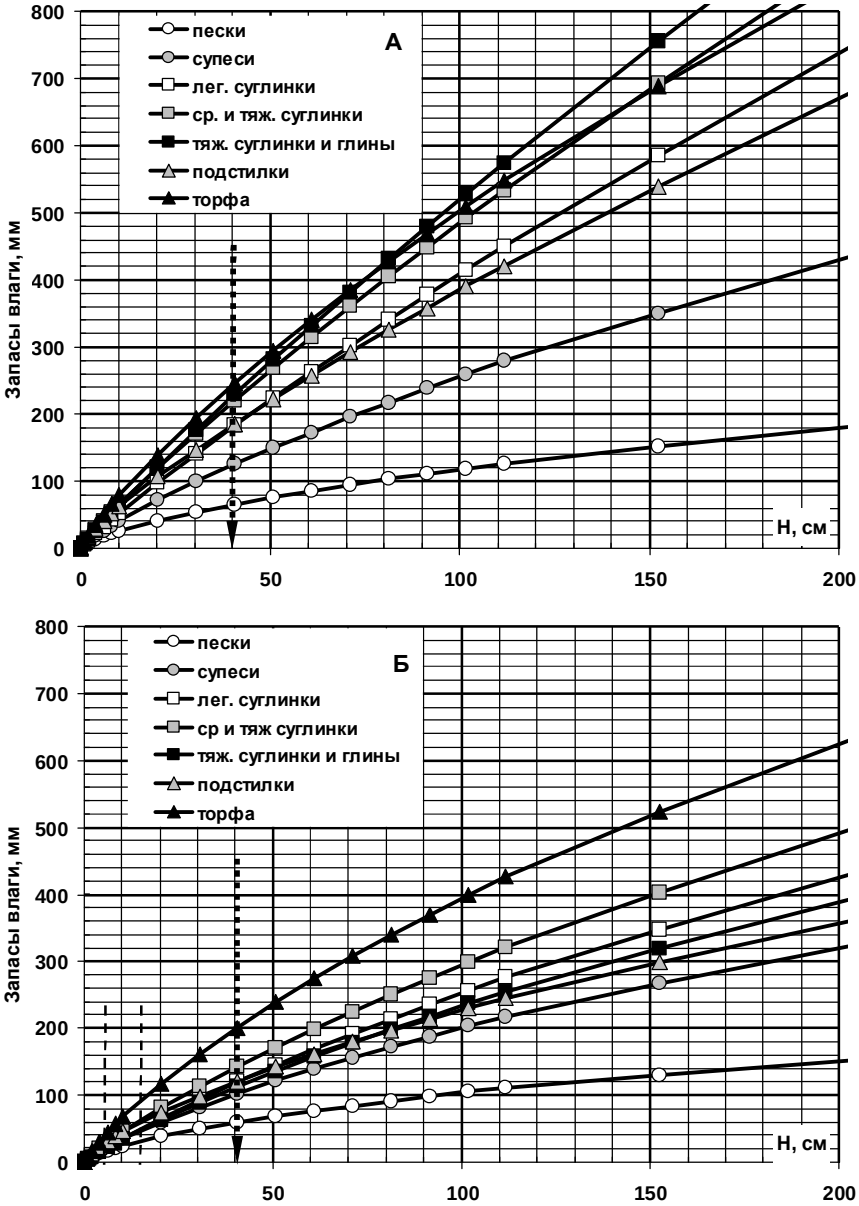


Рис. 5.11. Номограммы расчета равновесных запасов влаги в почвенной толще H. А – общие запасы, Б – запасы доступной влаги.

Полученные таким образом номограммы содержания равновесных запасов влаги в зависимости от параметра Н представлены на рис. 5.11. Причем в верхней части рисунка приводятся кривые общих запасов влаги, а в нижней – продуктивной или доступной для растений влаги. Последняя величина была получена по разности между общими запасами и запасами прочносвязанной влаги, недоступной для большинства растений, соответствующей абсолютной величине давления 1500 кПа [Шеин, 2005]. В результате класс почвогрунтов «тяжелые суглинки и глины», имеющий максимальные общие запасы влаги (рис 5.11-А) по критерию доступной влаги переместился на 4 позицию, расположившись между легкими суглинками и подстилками (рис. 5.11-Б). Торфяные почвогрунты характеризуются максимальной аккумуляцией равновесной влаги на единицу мощности почвенного тела, причем большая часть влагозапасов представлена доступной для растений категорией (рис. 5.11-Б). Это качество и определяет на наш взгляд столь частое применение торфяных почвогрунтов и почвомодификаторов на практике озеленения и рекультивации земель.

Полученные номограммы связывают два наиболее значимых для проектирования почвенных конструкций параметра – общую мощность почвенной толщи (Н), отражающую запас всего почвенного ресурса на единице площади и количество удерживаемой в нем влаги после обильного увлажнения и гравитационного оттока (равновесные запасы влаги). Последний показатель напрямую определяет продуктивность зеленых насаждений (рис. 1.1, 1.2). Очевидно, при проектировании конструктозема исходным показателем является величина Н. Ниже глубины Н можно проложить грубодисперсный экран для защиты корнеобитаемой толщи от техногенного загрязнения и засоления противогололедными препаратами. По номограммам рис. 5.11 определяем в зависимости от доминирующего почвогрунта запасы влаги, которые он может удержать. Так, пусть величина Н=40см (достаточный объем почвенного ресурса, согласно рис. 1.15), а почвогрунт является средним суглинком (линии с серым квадратным маркером номограммы 5.11). Тогда в рабочей толще конструктозема 0-40см сосредоточится до 220 мм влаги

из которых 140 мм будут доступны растительности (см. пересечения указанных линий с черной стрелкой H=40 см на рис 5.11-А,Б). Этого количества достаточно на поддержание эвапотранспирационных расходов порядка 4мм/сут в течение 35 суток. Причем никакого иного расхода в конструктоземе быть не может, поскольку грубодисперсный экран отрезал рабочую толщу от нижележащего почвогрунта, и прервал капиллярное рассасывание влаги вглубь почвы. Таким образом для данной конструкции больше ничего и не требуется, за исключением обычных методов ухода за растениями (внесение удобрений, рыхление, сенокошение…). Полив потребуются не ранее чем через 30-35 дней, если к этому моменту не будет осадков, что, в общем то маловероятно.

Рассмотрим аналогичный пример в случае песчаного почвогрунта. Последние, кстати, имеют наибольшее распространение в условиях столичного мегаполиса, занимающего территории речной долины и древней флювиогляциальной арены, в результате чего порядка 70% состава культурного слоя города представлено песками [Почва, город, экология, 97]. Равновесный запас влаги в 40см толще такого почвогрунта не превысит 60мм (рис. 5.11). И хотя практически вся эта влага будет доступной растениям, ее хватит лишь на 15 дней активного водопотребления, после чего газон необратимо увянет. Заметим, что аналогичный прогноз был получен при использовании среды компьютерного моделирования HYDRUS (рис. 5.4), что подтверждает возможность предложенного метода номограмм для оценочных расчетов. Очевидно, для пролонгации периода активного роста и развития газона без дополнительных поливов, которые, к сожалению, редко организуются в масштабе города в засушливое время, требуется внесение в корнеобитаемую толщу влагоаккумулирующих почвомодификаторов. С этой целью можно использовать торф, обладающий, как уже отмечалось выше, наилучшими абсорбционными качествами по отношению к почвенной влаге и водорастворимым элементам минерального питания. Так если проложить 10 см слой торфа на глубине 5-15 см от поверхности, равновесный запас продуктивной влаги в нем будет порядка 60мм (см. номограмму 5.11-Б – линия запасов влаги для торфов в границах отрезка между двумя

серыми пунктирами). Эта операция не сильно уменьшит запас влаги в песке, поскольку основное количество влаги в нем сосредоточено на удалении от поверхности. Тогда в сумме с оставшимся запасом в песке (≈50мм) подобная конструкция буде удерживать уже 110мм продуктивной влаги, чего вполне достаточно для 1 месяца активного функционирования газона без дополнительных осадков (полива). При обычных транспирационных коэффициентах для трав порядка 700-1000 единиц запасы продуктивной влаги в 110мм (1100т/га H_2O) будут эквивалентны 11-16 ц/га прироста фитомассы, то есть вполне удовлетворительным характеристикам роста для условий средней полосы России [Ларин, 56]. Результаты оценки по номограммам потенциальных возможностей конструктозема на основе торфа по отношению к аккумуляции влаги и здесь вполне соответствуют прогнозному моделированию в системе HYDRUS (рис. 5.7). Вместе с тем номограммы дают лишь вариант равновесного (предельного) случая, а компьютерное моделирование позволяет рассматривать самые разнообразные климатические сценарии с периодическим поступлением осадков, внутрипочвенным перераспределением влаги, переменным водопотреблением, ростом корневых систем и их локализации на тех или иных глубинах, то есть реальное неравновесное поведение сложной системы «почва-растение-атмосфера».

5.3. Оценка глубины заложения органогенных слоев почвенных конструкций по моделям их потенциальной биодеструкции.

Очевидно, что при проектировании почвенных конструкций важно оценить также ***потенциальный срок службы*** органических почвомодификаторов и возможность его пролонгирования при заглублении рабочего слоя конструкции на основе подобных материалов. С этой целью можно использовать экспоненциальную модель биодеструкции органических веществ в почве, а также распределенные модели органопрофиля и функции биодеструкции (дыхания) почв [Смагин 2005, Смагин и др., 2001, Bridges, Batjes, 96]. Экспоненциальная модель деструкции (разложения)

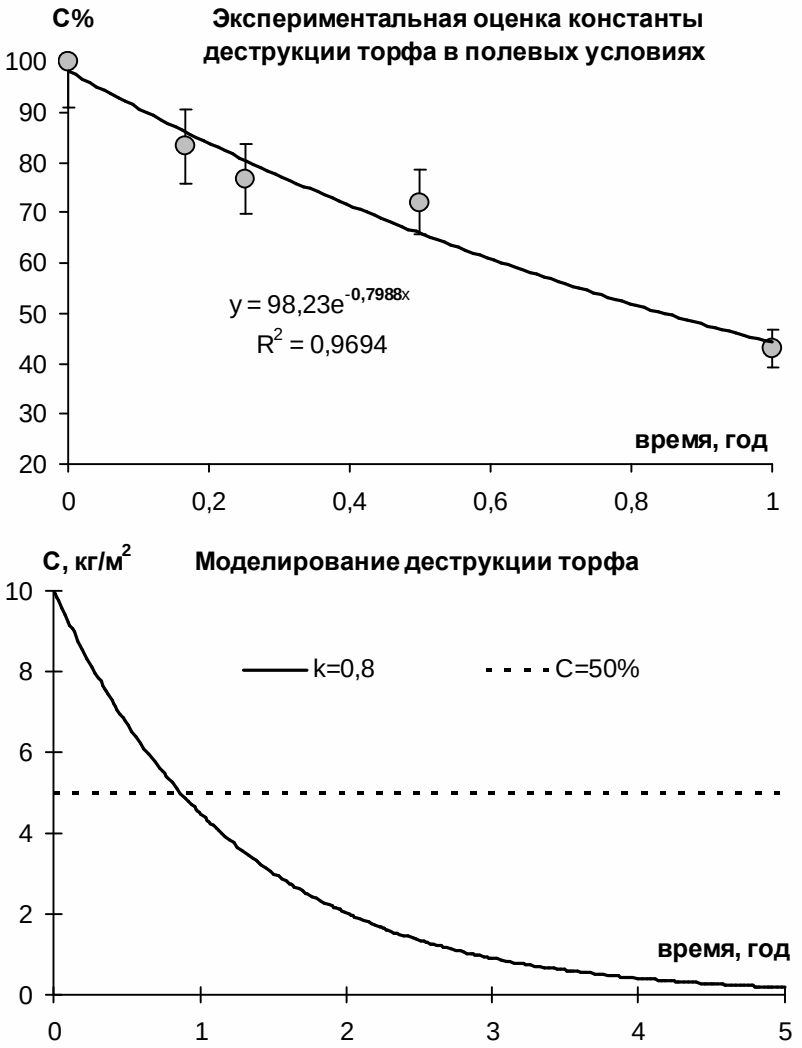


Рис. 5.12. Оценка константы биодеструкции торфа в полевом опыте и моделирование процесса его микробного разложения

органических веществ предполагает, что скорость разложения пропорциональна концентрации органического компонента (кинетика первого порядка) с константой пропорциональности

k, связанной простым соотношением с периодом полураспада вещества ($T_{0,5}$): $k=\ln 2/T_{0,5}$. По такой модели, зная $T_{0,5}$ или k, легко определить сколько останется органического компонента на поверхности почвы по прошествии того или иного времени (t), согласно уравнению (2.12). Входной информацией здесь служит осредненная за год константа биодеструкции k (период полураспада $T_{0,5}$) или их функциональные зависимости от температуры и влажности [Смагин, 2005], см также § 4.4. В идеале этот показатель должен включаться в технический паспорт (сертификат) почвомодификатора наряду с химическим составом и анализом на загрязняющие вещества. Однако в российской практике это не принято [Безуглова, 2002], отсюда возникает необходимость самостоятельной количественной оценки величины k или $T_{0,5}$. С этой целью можно воспользоваться двумя группами методов – полевыми и лабораторными [Бамбалов, 84, Методы…, 91, Смагин и др., 2007]. Наименее трудоемкий, но вместе с тем длительный метод – экспонирование органического материала в проницаемых капсулах в полевых условиях с периодическим взвешиванием и расчетом потерь на биодеструкцию. Располагая данные по количеству материала (массе или концентрации в % от исходного содержания) в зависимости от времени (C(t)) и аппроксимируя эту зависимость функцией (2.12) легко получить искомый параметр k (рис. 5.12). Как видно значение параметра k для торфа составило 0,7988 год$^{-1}$, что соответствует периоду полураспада $T_{0,5}$ =0,87 года. На получение объективной информации уходит не менее 1 года, а оценка по более коротким интервалам (2-3 летних месяца) обычно дает завышение результатов на 15-30% и более.

Альтернативный метод позволяет быстро (в течение суток) оценить темпы потенциальной деструкции в лабораторных условиях по дыханию (удельной эмиссии CO_2 или поглощению O_2) при инкубировании образцов в условиях оптимальной температуры и влажности. Далее, зная ход температурной зависимости и влажности почвы в течение года, легко найти среднегодовую константу биодеструкции (k) расчетным путем, используя нелинейные эмпирические модели этого процесса в зависимости от гидротермических факторов [Смагин, 2005], см. также § 4.4. На рисунке 5.13 показан вариант

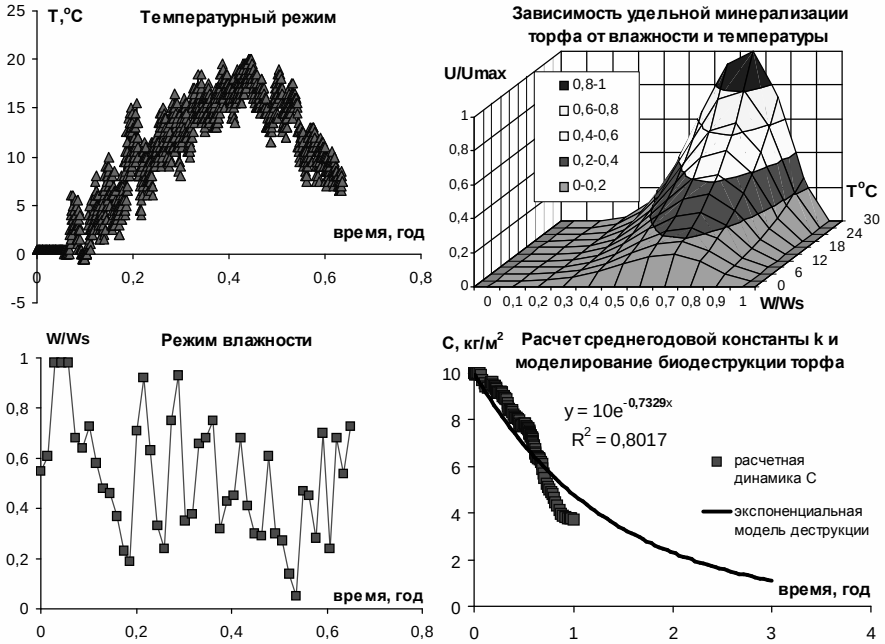


Рис. 5.13. Расчетная оценка константы биодеструкции торфа по данным мониторинга режимов температуры и влажности и лабораторного эксперимента по кинетике минерализации в зависимости от гидротермических параметров.

подобной оценки для торфяного субстрата, использующегося при озеленении в условиях мегаполиса. Мониторинг температуры и влажности в поверхностном слое 0-5см проводился с помощью современных технологий с использованием программируемых датчиков DS1923 и полевых гравиметров, согласно нашим разработкам [Смагин и др., 2006]. Рассчитанная среднегодовая константа биодеструкции составила 0,7329 год$^{-1}$ (период полураспада $T_{0,5}$ =0,94 года), что близко к полученной ранее оценке непосредственно в полевых условиях (рис. 5.12, 5.13).

По данным о величинах k с использованием модели (2.12) легко осуществить ориентировочный прогноз динамики органического компонента на поверхности почвы (рис. 5.12,

5.13). Как уже неоднократно отмечалось выше (§ 1.1, § 4.4, фото 3 Приложения) используемый в озеленении торфяной субстрат не отличается устойчивостью, и уже по прошествии одного года теряется порядка половины этого компонента. К концу второго года на поверхности остается не более 15-20% от исходного количества растительного субстрата, что означает неминуемую деградацию газона.

Можно ли исправить эту ситуацию, типичную для мегаполиса, и в технологиях почвенного конструирования запрограммировать варианты сохранения органогенных материалов от биодеструкции? Как показывает анализ природных процессов организации почв и ряда земледельческих технологий на торфяных почвах (см. главу 1), такая возможность существует и заключается в расположении слоя органогенного материала в глубине почвы, на определенном расстоянии от поверхности. На рисунке 5.14 приводятся материалы лабораторного эксперимента осуществленного с целью выявления зависимости биологической активности в торфяном почвомодификаторе от мощности перекрывающего его слоя тонкозернистого кварцевого песка. Из результатов исследования видно, что уже при небольших дозах песка порядка 2-5 см отмечается статистически достоверное снижение биодеструкции (эмиссии CO_2) в 2,5-4 раза. Этот факт подтверждает целесообразность технологии слоистой закладки торфяных почвомодификаторов с экранированием их минеральным почвогрунтом с поверхности или аналогичных по сути методов пескования поверхности торфяных почв (покровная культура) и зеленых газонов, применяемых на практике [Бамбалов, 84, Ларин, 56, Смагин и др., 2008]. Экранирование слоями большей мощности порядка 10-15см означает с одной стороны большие трудозатраты и материальные расходы, однако при этом интенсивность биодеструкции снижается на порядок в 7-10 (до 15) раз, что означает аналогичное увеличение срока службы органогенного растительного слоя с 1-2 лет до 10-15 и более. В условиях мегаполиса гарантировать бóльшие сроки, по-видимому, и нет нужды, поскольку перманентная градостроительная деятельность, ремонт и прокладка подземных коммуникаций, автодорог, работы по комплексному благоустройству будут

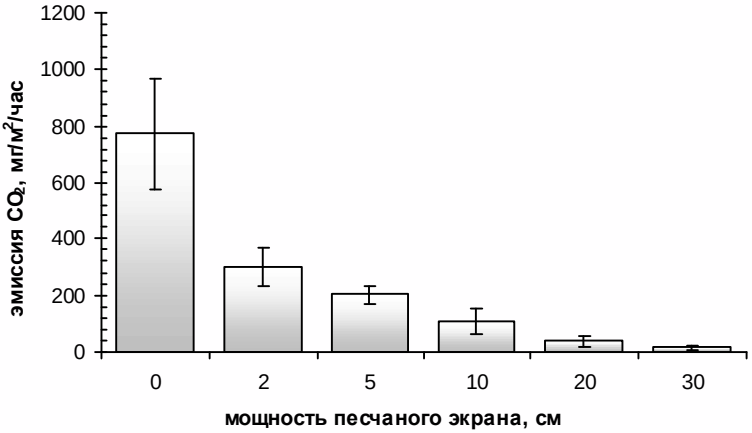


Рис.5.14. Экспериментальная оценка влияния глубины заложения органогенного почвомодификатора на интенсивность его биодеструкции и эмиссионных потерь CO_2 (пояснения в тексте).

неминуемо нарушать сложившийся почвенный покров за такой период. Таким образом, при создании конструктоземов на основе твердофазных органогенных почвомодификаторов достаточно перекрытие поверхности плодородного влагоаккумулятивного слоя грубодисперсным экраном от 2 до 10 см мощности. Для специальных видов конструкций, создаваемых на особо ответственных объектах озеленения и благоустройства можно использовать два аккумулятивных слоя почвомодификатора с заглублением второго (резервного) на достаточно большое расстояние порядка 30-50см. Интенсивность биодеструкции этого слоя будет снижена минимум в 50-60 раз, по сравнению с вариантами размещения на поверхности. Со временем корни трав проникнут в него и будут иметь дополнительный источник минерального питания и влаги. Аналогичная ситуация возникнет и в локальных почвенных конструкциях для древесной и кустарниковой растительности, где органогенные влагоаккумлятивные почвомодификаторы размещаются на глубинах 50-100см и более [Смагин и др., 2008].

Точный ***расчет глубины заложения*** органических

компонентов осуществим на базе разработанных нами распределенных моделей органопрофиля почв [Смагин, 2001, Смагин и др., 2001]. В качестве необходимой и достаточной информации требуется экспериментально оценить профильное распределение биогенных источников эмиссии CO_2 (поглощения O_2) в почве на основе модифицированных методов инкубации образцов почвы [Смагин, 2005, Смагин и др., 2007]. На рисунке 1.14 (см. главу 1) приводятся результаты подобной оценки для природных подмосковных почв разного генезиса. Вертикальные распределения биогенных источников CO_2 в агрогенных, торфяных и лесных почвах носят схожий характер, а именно – быстрое (экспоненциальное) снижение интенсивности эмиссии с глубиной (h), согласно функции:

$$U(h) = U_{max}\exp(-b \cdot h) + U_0, \qquad (5.2)$$

где U_{max} и U_0 – максимальные (на поверхности почвы) и фоновые (на большой глубине) значения биогенного выделения CO_2, b – экспоненциальный показатель снижения биологической активности с глубиной.

Поскольку эмиссия CO_2 в объеме образца почвы отражает интенсивность минерализационных процессов (биодеструкции) в нем, можно считать, что эта универсальная закономерность характерна для распределения скоростей разложения биополимеров в почвенной толще. Подобное резкое падение биологической активности с глубиной в почвах связано со множеством причин, среди которых наиболее важными являются закономерности профильного распределения биомассы микроорганизмов, корней и легкоразлагаемых органических субстратов, а также диффузионный поток кислорода из атмосферы в почву (интенсивность газообмена), замедляющийся с глубиной. Так согласно полученной экспоненциальной регрессии (сплошные линии на рисунке 1.14) в случае дерново-подзолистой минеральной почвы 50% источников сосредоточены в верхнем 6см почвенном слое, а 90% – в 20см. Для более развитой и обогащенной органическим веществом перегнойно-торфяной почвы аналогичные характеристики составляют порядка 10 и 30 см, соответственно. Это означает, что заглубление органического материала на 5-10 см от поверхности гарантирует снижение темпов его биодеструкции в 1,5-2 раза с соответствующим увеличением

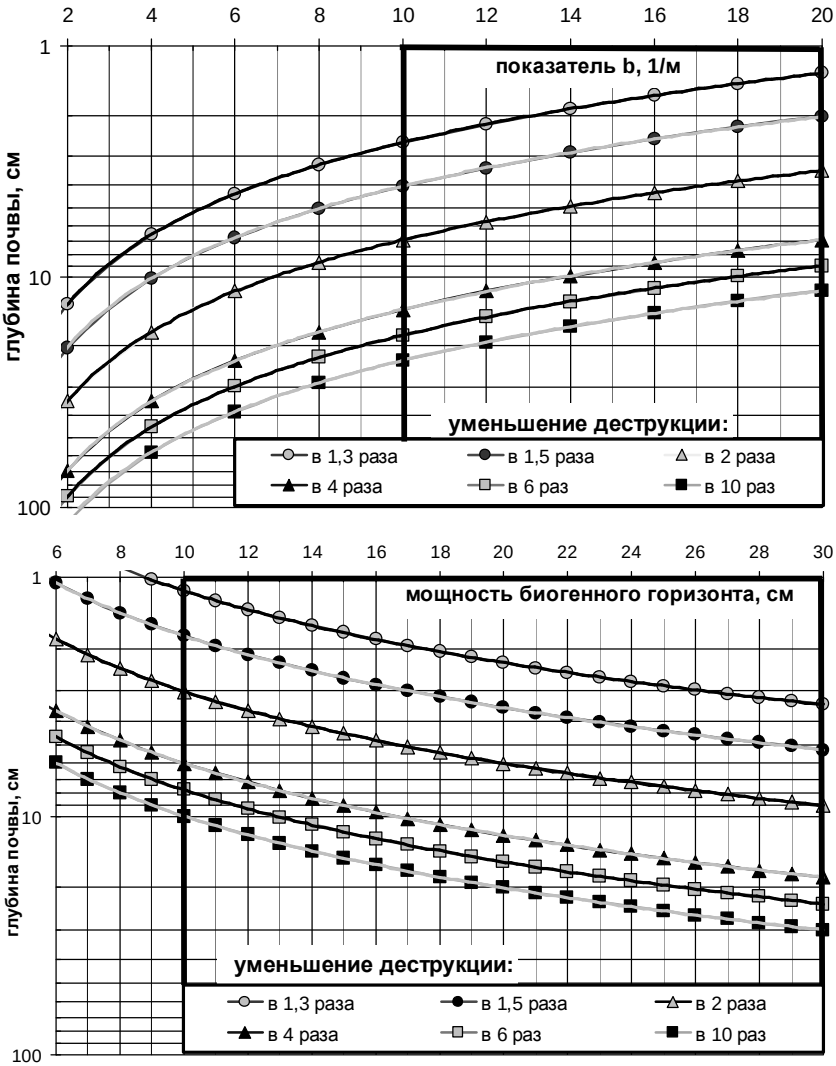


Рис. 5.15. Номограммы для расчета мощности слоя, экранирующего органические материалы почвенных конструкций от биодеструкции.

срока службы почвомодификатора. Для удобства оценочных расчетов автором были разработаны ***номограммы***, позволяющие оценить во сколько раз замедлится разложение

биополимерного материала при его заглублении на то или иное расстояние от поверхности почвы (рис. 5.15). Верхняя номограмма использует экспоненциальный показатель снижения биологической активности с глубиной (b), согласно модели (5.2). Поскольку этот показатель необходимо определять экспериментально, в упрощенном варианте номограммы (нижняя иллюстрация) есть возможность проводить ориентировочную оценку по величине мощности биогенного (гумусированного) слоя (h_b). Обычно для условий мегаполиса и типичных почвенных объектов гумидной зоны эта величина варьирует в пределах 10-20см [Смагин и др., 2010]. В поверхностном биогенном горизонте сосредотачивается основное количество корней растений, микроорганизмов и основная часть процессов биологического круговорота.

Подобная оценка по номограммам чрезвычайно проста. Надо отложить по горизонтальной оси значение соответствующего показателя (b или h_b), спроецировать его на кривую кратности уменьшения деструкции и найти вертикальную координату полученной точки пересечения. Эта координата в см даст необходимую глубину заложения органического материала или мощности слоя минерального почвогрунта, экранирующего этот материал от поверхности. Например, при полевом обследовании территории, на которой планируется создать почвенную конструкцию обнаружено, что мощность биогенного горизонта h_b равна 13 см. Тогда по нижней номограмме рис. 5.15 находим значение мощности перекрывающего органический материал слоя, задавая ту или иную кратность снижения его деструкции. Так для двукратного снижения (кривая с серым треугольным символом) достаточно 4см покрытия, для четырехкратного (черный треугольный символ) – 8см, а при удалении биополимера на 12 см глубину от поверхности срок его службы можно увеличить на порядок.

Полученные результаты технологического моделирования были успешно подтверждены практическими экспериментами, проведенными в лабораторных условиях на макетах почвенных конструкций малого размера. В последнем разделе данной главы приводится информация, касающаяся этого анализа. Результатам полевых экспериментов с реальными почвенными конструкциями посвящена отдельная глава монографии №8.

5.4. Экспериментальные исследования и моделирование слоистых почвенных конструкций на макетах малого размера.

Обратимся к сопоставлению данных проектного технологического моделирования и экспериментальной информации о реальных почвенных режимах в слоистых конструкциях, выполненных в виде макетов малого размера. Схемы и устройства конструкций представлены на иллюстрации 7 Приложения в конце книги. Для создания макетов почвенных конструкций в мастерских ф-та почвоведения МГУ были подготовлены специальные емкости из оргстекла в форме параллелепипеда 13х13х50см. В одну из стенок были герметично вмонтированы керамические свечи тензиометров для измерения капиллярно-сорбционного и гравитационного давления (потенциалов) почвенной влаги с двумя вариантами манометров (вакуумметров) – заводскими со стрелками и стеклянными конструкции проф. Судныцына [Судницын, 79]. Вдоль соседней стенки на аналогичных отметках были помещены диэлькометрические датчики влажности с измерительным устройством SH-0453 по [Смагин и др., 2006]. Для периодического отбора почвенных проб в этой стенке были сделаны цилиндрические отверстия под диаметр трубки пробоотборника (6мм). Отверстия герметизировались резиновыми пробками. Дно вмещающих емкостей перфорировалось для свободного оттока влаги и устилалось тонким слоем рыхлого геотекстиля во избежание высыпания сухого песка из колонны при ее заполнении. На всю длину колонн по их центру помещались пластмассовые линейки с вмонтированными датчиками «термохрон» и «гигрохрон» DS1921G и DS1923 для автоматизированного контроля гидротермических параметров [Смагин, 2005, Смагин и др., 2006], см. также главу 3.

На основе емкостей были сформированы три различных варианта макетов слоистых почвенных конструкций:

- контроль (чистый гомогенный кварцевый песок);
- конструкция с гидрогелем (10см слой 0,2% СПГ в песке);
- конструкция с органогенным кондиционером (10см слой 100% торфосапропелевого почвомодификатора «Arid Grow» в песке).

При засыпке кварцевого песка производилось тщательное перемешивание во избежание образования слоистости. Внесение органогенного почвомодификатора и песчаной композиции 0,2%СПГ осуществлялось в верхнюю толщу на расчетную глубину, после заполнения основного пространства колонн кварцевым песком так, чтобы сформировать из этих материалов слой 10 см мощности и перекрыть его 5см слоем песка сверху (фото. 7). Для определения массы почвенных материалов и плотности их сложения, а также динамики общих запасов влаги в ходе дальнейших экспериментов колонны взвешивались на напольных электронных весах с точностью 10г. Для прогрева колонны и усиления испарения влаги с поверхности использовались источники света в виде лабораторных ламп накаливания 100 Вт на шарнирах, позволяющих менять их расстояние до поверхности почвы и, соответственно интенсивность нагрева. Дозированная подача воды в опытах со впитыванием и фильтрацией осуществлялась посредством Мариоттова устройства в виде перевернутой мерной колбы на 2л (рис. 2.6). Профильтровавшаяся влага собиралась в пластмассовом поддоне с последующим определением объема с помощью мерного цилиндра. Для оценки равновесной (наименьшей) влагоемкости после промачивания колонны использовалась изоляция поверхности от испарения посредством бытовой полиэтиленовой пленки.

Эксперименты с макетами предусматривали чередование следующих почвенных режимов:

- напорное впитывание влаги с поверхности в сухой почвогрунт;
- напорная фильтрация;
- свободный гравитационный отток с изоляцией поверхности от испарения;
- сушка с поверхности при нагреве (неизотермическое испарение);
- изотермическое испарение с поверхности при комнатной температуре.

На рисунках 5.16-5.17 приведены результаты исследования двух основных процессов – ***напорного впитывания и последующей фильтрации*** влаги. Как и в

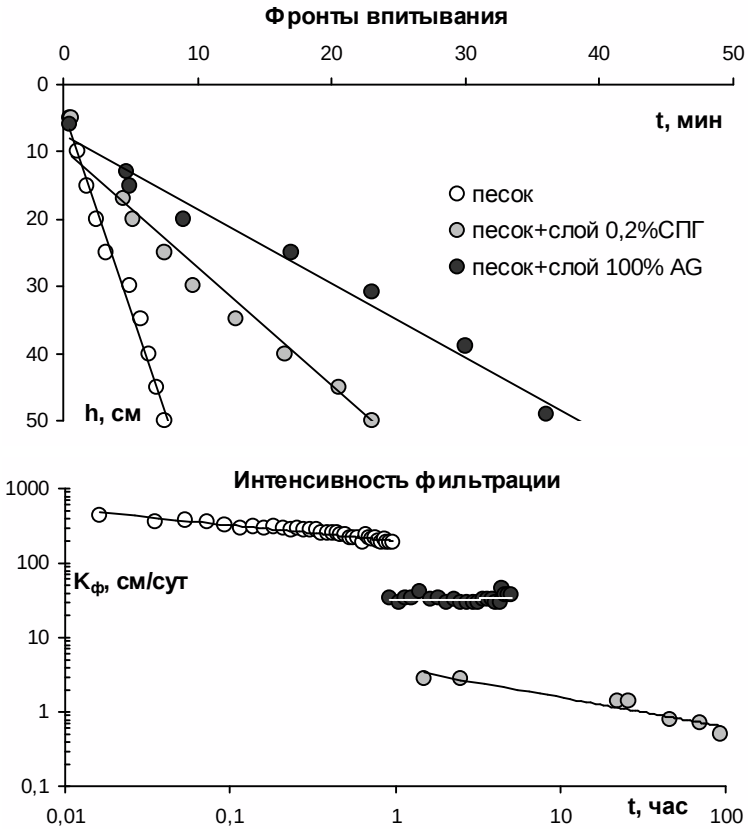


Рис. 5.16. Сравнительный анализ интенсивности впитывания и фильтрации влаги в кварцевом песке и в макетах слоистых конструкций. **Аналитики А.А. Шитухина и А.В. Рачек.**

предыдущих опытах с малыми цилиндрическими почвенными колонками (трубками) (см. § 4.2) слоистый способ размещения почвенных материалов в конструкциях приводил к существенному снижению интенсивности движения влаги в почвенном профиле. Для конструкции с СПГ при впитывании скорость снижалась в 3-4 раза, а при фильтрации в 150-380 раз по сравнению с гомогенным песком (контролем). Слой органогенного почвомодификатора эффективнее (в 6-7 раз) замедлял впитывание (капиллярное рассасывание), по-

видимому, из за гидрофобности сухого торфяного материала, проявлявшейся на стадии смачивания. Однако снижение темпов фильтрации воды здесь было не столь большим (~в 5-10 раз по сравнению с таковыми в колонне с чистым песком.

Характерно, что коэффициенты фильтрации на контроле и в конструкции с 0,2% СПГ со временем постепенно уменьшались (рис. 5.16), по-видимому, из-за перестройки упаковки песчаных частиц в более компактную гексагональную, а также эффекта кольматации проводящих пор тонкими минеральными частицами и набухшим гидрогелем. Для органогенного почвомодификатора, напротив, темпы фильтрации оставались практически неизменными, хотя, возможно по сравнению с конструкцией с гидрогелем здесь просто был меньшим интервал наблюдений, и за такое время потенциальное снижение фильтрации за счет разбухания торфа не успело произойти. Варьирование величины $К_ф$ в песке составило 190-430см/сут при среднем значении 254 см/сут и доверительном интервале ±20 см/сут при 95% уровне значимости. Для конструкции с гидрогелем наблюдалось варьирование коэффициента фильтрации от 0,5 до 2,9 см/сут при средней величине 1,5±0,7 см/сут. С технологической точки зрения важен факт сильного снижения интенсивности фильтрации при внедрении слоя СПГ до значений, характерных в природе лишь для водоупоров. Органогенный модификатор, как уже отмечалось, был менее эффективным и средний коэффициент фильтрации в конструкции на его основе составил в течение двух суток эксперимента 29±2 см/сут. При этом в первый день наблюдений средняя величина $К_ф$ 31±3 см/сут была ненамного выше таковой на вторые сутки (26±3 см/сут). Разброс наблюдаемых значений коэффициента фильтрации в конструкции с органогенным кондиционером был от 10 до 46 см/сут.

Для имитации процессов движения влаги с помощью модели HYDRUS-1D экспериментально были получены ОГХ кварцевого песка, органогенного почвомодификатора и композиции песка с 0,2% гидрогеля и (рис.5.1). При этом помимо базового метода равновесного центрифугирования были использованы также данные об инвариантном (конечном) распределении влаги в самой колонне с песком после

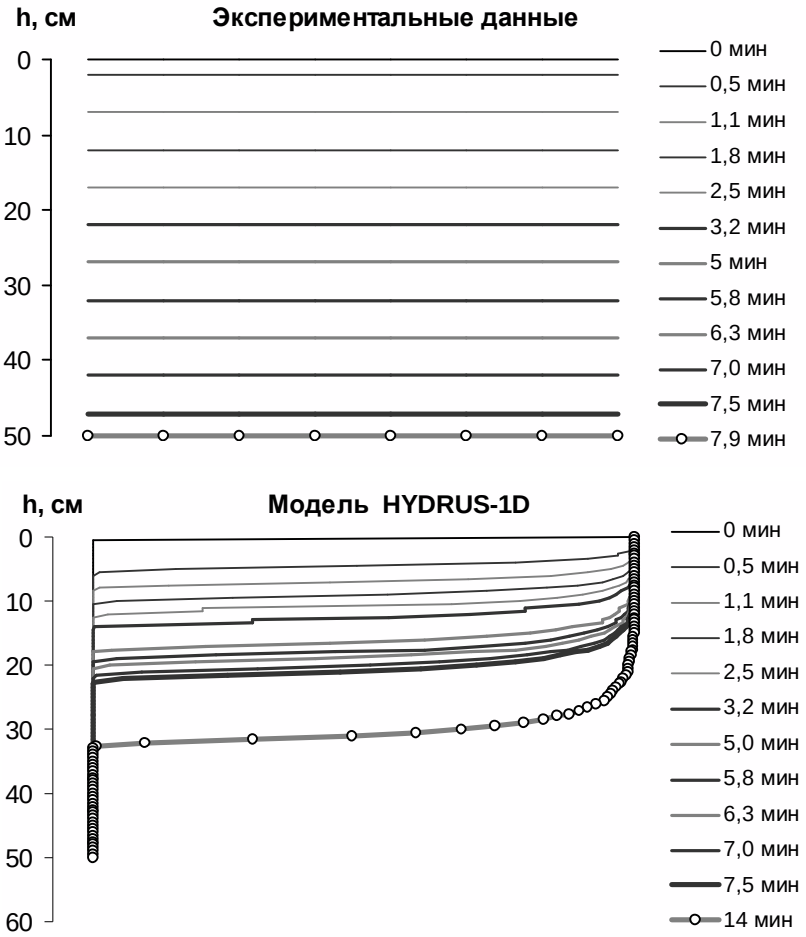


Рис. 5.17. Динамика впитывания влаги в кварцевый песок и моделирование этого процесса.

прекращения гравитационного оттока. Оцененные этим способом точки $P(\Theta)$ визуально вполне соответствовали ОГХ, полученной методом центрифугирования (верхний график на рис. 5.1). Однако их отдельная аппроксимация функцией ван-Генухтена дала параметры Θ_s, Θ_r, n, весьма отличные от таковых для первой ОГХ (табл. 5.1). Поэтому в численных

экспериментах были использованы обе ОГХ, полученные как с помощью центрифуги, так и методом высоких колонн.

Попытка воспроизвести режим впитывания в колонне с песком с помощью модели HYDRUS-1D не привел к удовлетворительным результатам при использовании экспериментально полученных величин ОГХ и коэффициента фильтрации. Даже при максимальной величине $К_ф$=430см/сут расчет по модели давал запаздывание движения фронта впитывания практически вдвое против реально наблюдаемого в эксперименте (рис. 5.17). Варьирование ОГХ (методы центрифугирования, высоких колонн), и начальных условий (от -100 до -400 см. вд. ст. матричного давления) не приводили к сколь либо существенным изменениям полученной картины. По всей видимости, используемая в системе HYDRUS-1D оценка функции влагопроводности по ван-Генухтену–Муалему (см. гл. 2) приводит к занижению этой величины относительно реальности для грубодисперсных субстратов, подобно тому, как занижается К(Р) с расчетом по Гарднеру в традиционных тензиометрических и капилляриметрических экспериментах по сравнению с методом равновесного центрифугирования (см. § 3.3). Это предположение подтверждается непосредственным сопоставлением расчетных (по Муалему) и экспериментальных функций влагопроводности, проведенным ранее (рис. 4.28).

При напорном впитывании в слоистых почвенных конструкциях возник феномен, который не в состоянии описать традиционные одномерные модели типа HYDRUS-1D, а именно – ***неустойчивость фронта впитывания*** и развитие на выходе из слоя с почвенными кондиционерами гидродинамической пальчатой структуры, по которой происходил преимущественный массоперенос влаги до самого дна колонны – так называемый «фингер-эффект» (фото 8, см. Приложение). Появление подобных структур в слоистых системах достаточно просто предсказывается теорией устойчивости границы раздел движущихся флюидов в пористой системе, критический анализ и обобщение которой даны в нашей работе [Смагин, 98]. К сожалению, адекватные динамические модели для описания подобных явлений фактически отсутствуют, в особенности для гомогенных грубодисперсных пористых сред, лишенных каких

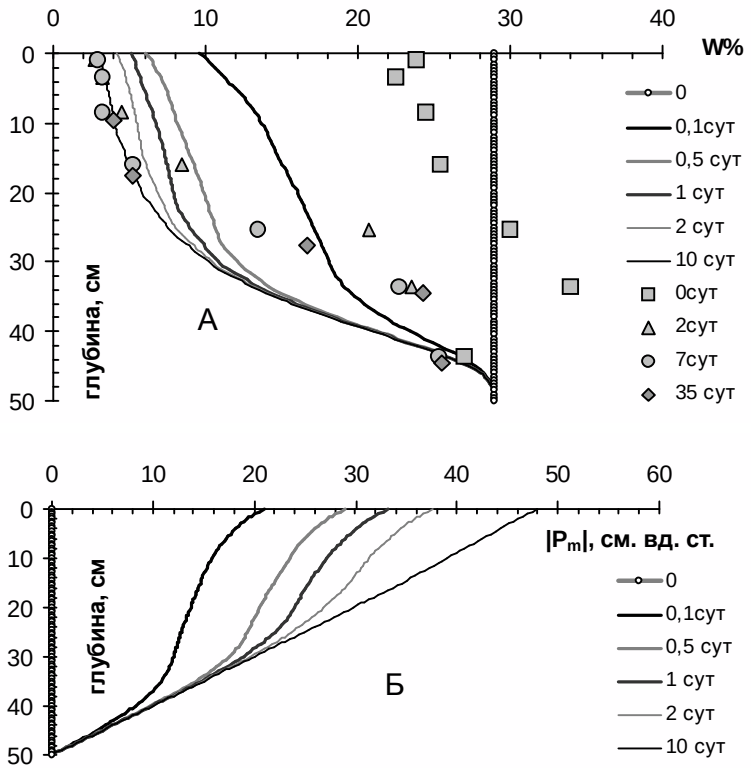


Рис. 5.18. Моделирование динамики влажности (А) и матричного давления влаги (Б) в колонне с песком при гравитационном оттоке (ОГХ – метод центрифугирования, $K_ф$=430 см/сут (максимальный)).

либо постоянных элементов преимущественного транспорта (трещин, макропористых каналов и т.д.), присутствующих в почвах среднего и тяжелого гранулометрического составов. Вместе с тем «фингер-эффект» может иметь весьма серьезный вклад в массоперенос влаги и ее перемещение (отток) вглубь почвы из коренеобитаемого слоя. Если для фронтального впитывания требуются большие количества осадков (поливные нормы), чтобы промочить всю почвенную толщу от поверхности до капиллярной каймы грунтовых вод, то через

пальчатую гидроструктуру проникновение влаги вглубь осуществляется с теми же скоростями, но с существенно меньшими объемами влаги, поскольку часть почвы, за пределами этой структуры остается сухой (фото 8). Для слоистых почвенных конструкций этот феномен должен быть сугубо исследован, поскольку подвешенная влага в корнеобитаемом слое может сбрасываться вглубь в отдельных «критических» точках, локусах, где создаются условия максимального перепада гравитационного давления, например из-за неоднородности рельефа или иных причин. Однако пока приходится констатировать, что эта задача не решена ни в теоретическом, ни в экспериментальном аспектах.

Возвращаясь к проблеме описания массопереноса влаги в исследуемых вариантах распределенных почвенных систем, обратимся к анализу результатов ***динамики влажности и матричного давления*** при свободном гравитационном оттоке (рис. 5.18-5.21). В эксперименте этот режим поддерживался посредством изоляции верхнего конца колонн от испарения влаги полиэтиленовой пленкой после окончания опытов по фильтрации. В модели HYDRUS-1D для его имитации было выбрано условие нулевого потока на верхней границе и нулевого давления на нижней границы, которое с таким же успехом можно было заменить на вариант «Seepage face» (см. гл. 2). В этих условиях итогом гравитационного оттока влаги должно стать инвариантное состояние, при котором в каждой точке почвенного профиля матричное давление (водоудерживающая способность почвы) уравновешивается гидравлическим давлением (силой тяжести воды), численно равным высоте данной точки над основанием колонны (уровнем свободной воды). То есть подобное равновесие характеризуется прямой линией на графиках распределения капиллярно-сорбционного потенциала (матричного давления) от высоты (глубины) почвенной толщи (рис. 5.18-Б, 5.19-Б). Анализируя модель Ричардса (2.9) (см главу 2), нетрудно убедиться, что такое состояние при нулевом «источнике-стоке» будет единственно возможным термодинамически-равновесным состоянием капиллярно-пористой физической системы с жидкой фазой в поле силы тяжести. Распределение влажности по профилю в этом состоянии, очевидно, повторит ОГХ, если в

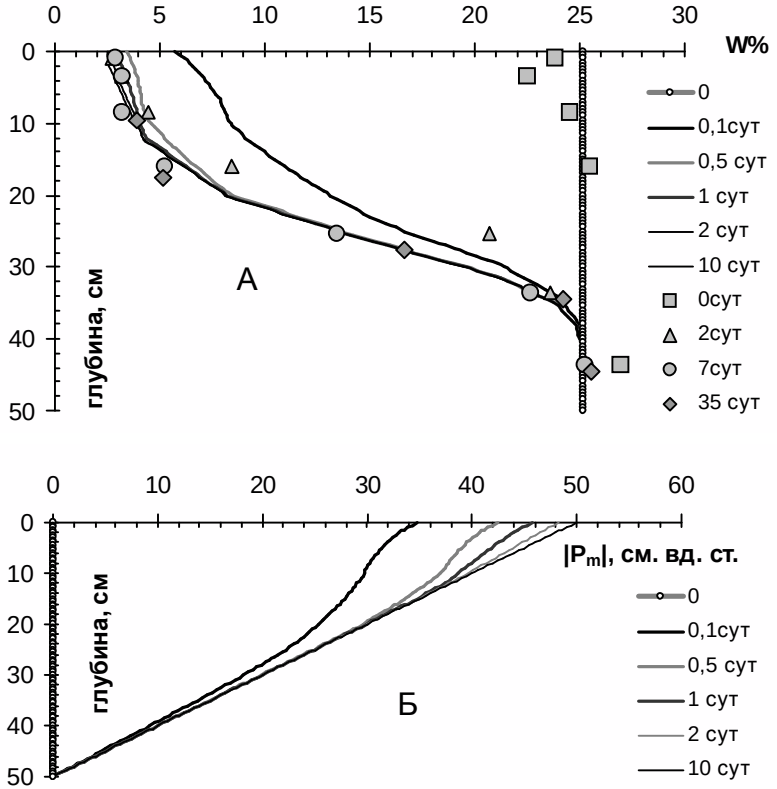


Рис. 5.19. Моделирование динамики влажности (А) и матричного давления влаги (Б) в колонне с песком при гравитационном оттоке (ОГХ – метод колонн, $K_ф$=254 см/сут (средний)).

последней давление выражено в см.вд.ст.

Акцентируем еще раз внимание на этих, казалось бы, тривиальных положениях, поскольку они позволяют нам понять физическую сущность такого феномена как «наименьшая влагоемкость» (НВ). Становится ясным, что в почвах величина НВ зависит не только от водоудерживающей способности твердой фазы, но и от мощности единого подвешенного водного тела, определяющего в данной точке величину гравитационного потенциала или силы тяжести, которая противостоит

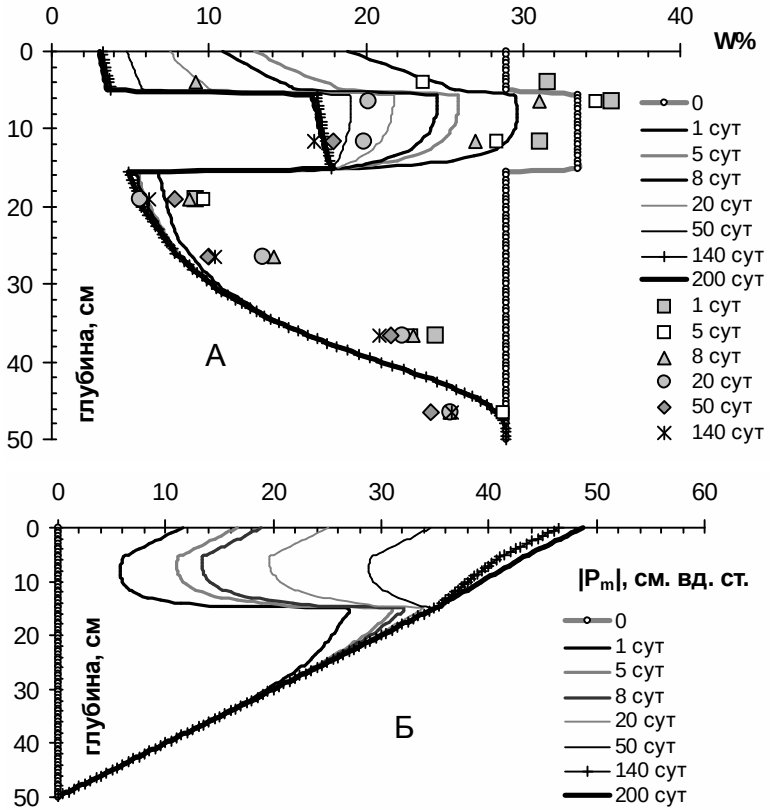


Рис. 5.20. Моделирование динамики влажности (А) и матричного давления влаги (Б) в почвенной конструкции со слоем 0,2% СПГ при гравитационном оттоке; (ОГХ – метод центрифугирования, Кф песка=430 см/сут (максимальный), Кф слоя геля=2,9 см/сут (максимальный)).

водоудерживающим капиллярно-сорбционным силам и стремиться удалить воду из почвы [Смагин, 2003, Смагин и др., 2008]. Важно и другое – на установление подобного равновесия требуется время и тем большее при прочих равных условиях (гранулометрический состав, структура почвы), чем глубже почвенный профиль. Расчеты показывают, что для

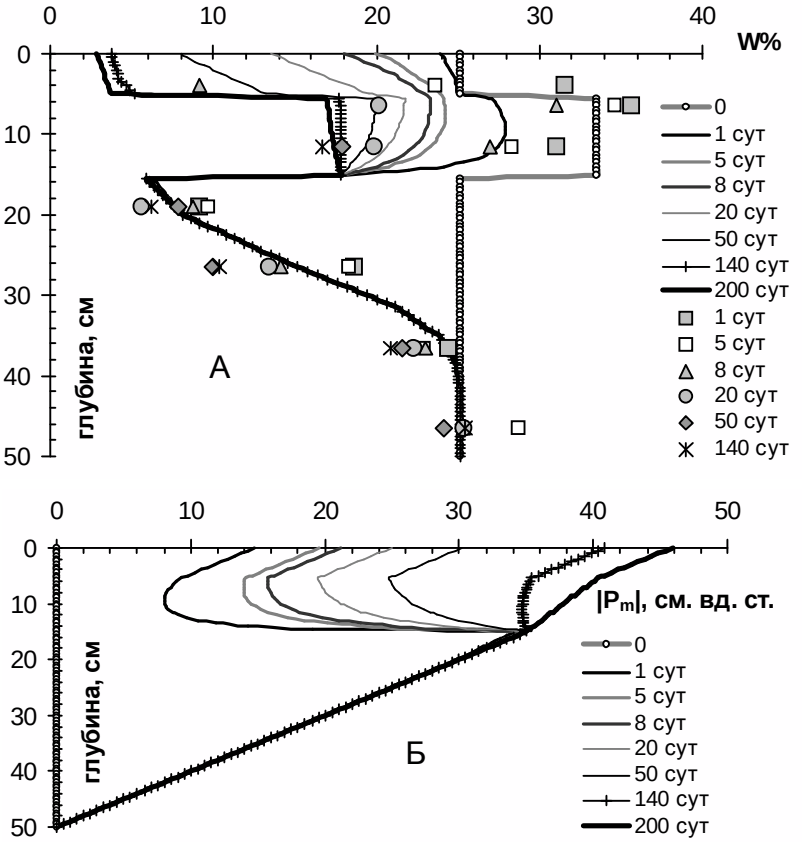


Рис. 5.21. Моделирование динамики влажности (А) и матричного давления влаги (Б) в почвенной конструкции со слоем 0,2% СПГ при гравитационном оттоке (ОГХ песка – метод колонн, Кф песка=254 см/сут (средний), Кф слоя геля=2,9 см/сут (максимальный)).

полнопрофильных почв с мощностью от 2м и глубже на установление равновесия уходит от 50 до 200-300 сут и более (рис. 2.3, глава 2) Отсюда ясен феномен «истинной НВ» по А.А.Роде, который наблюдал в полевых условиях в течение многих месяцев за динамикой влаги почв при свободном гравитационном оттоке и пришел к выводу о длительности установления равновесия. На то же указывают факты

непрекращающегося «пленочного стока» влаги в песках по [Гаель, Смирнова, 99] после наступления якобы равновесного состояния в виде полевой НВ.

Вместе с тем есть проблемы и с моделированием феномена НВ. Ведь для вариантов глубокого залегания грунтовых вод фактически модель будет воспроизводить в качестве равновесного состояния плавное распределение в виде ОГХ от нижней границы (отметки грунтовых вод), будь она хоть на 100 м (давление 10000 см.вд ст.) до поверхности почвы. Но это означает наличие гидравлической связи и передачи гидростатического давления на такое расстояние, чего в природе не бывает. Вода в песках капиллярно никогда не поднимется выше 30-50см, а расчет по модели Ричардса даст подъем на любую высоту, в соответствии с заложенной ОГХ. То же о ВРК – после разрыва капиллярной сплошности и входа воздуха в поры прекращается передача гидростатического давления, резко снижается интенсивность массопереноса влаги и, главное, растворенных веществ, поскольку движение влаги в основном идет по пути диффузии, термодиффузии и термокапиллярно-менисковому переносу, исключающему перемещение солей. Модель с гладкой функцией ОГХ не позволит адекватно воспроизвести эти явления и режимы, разве что только выбрать в качестве ограничивающего параметра остаточной влажности (Θ_r) не Wa (гигроскопическую влажность, нерастворяющий объем), как это обычно предполагается, а ВРК.

Возвращаясь к анализу наших экспериментов, отметим, что в исследуемой колонне с песком малой мощности (50см) равновесие устанавливалось уже на 1-2 сутки, что весьма удовлетворительно описывалось в рамках модели HYDRUS-1D (рис. 5.18-5.19). Результаты в наибольшей степени адекватные реальности были получены при использовании в качестве ОГХ собственно экспериментальных данных по конечному (равновесному) распределению влажности в колонне (рис. 5.19). В целом, используемая модель с экспериментальным обеспечением на базе разработанных инструментальных методов оценки гидрофизических характеристик (гл. №2) позволяет вполне адекватно прогнозировать водоудерживающую способность и динамические режимы физического состояния почвогрунтов с небольшой мощностью

профиля без предварительной настройки (подгонки).

На следующей серии рисунков (5-20, 5-21) анализируется вариант слоистой почвенной конструкции с гидрогелем. Несмотря на невозможность учета преимущественного массопереноса в виде «фингер-эффекта» модель также вполне удовлетворительно воспроизводит качественную картину распределения влаги, а именно – ее «подвешивание» во влагоаккумулятивном слое с 0,2% СПГ. Причем пик влажности в слое сохраняется после гравитационного оттока и установления равновесия, в соответствии с ОГХ гелевой композиции, обладающей большей по сравнению со вмещающим песчаным материалом водоудерживающей способностью. Как и в предыдущем случае с чистым песком, лучшие количественные результаты были получены при использовании в качестве ОГХ экспериментальных данных по равновесному распределению влаги (метод колонн). Темпы установления равновесия в конструкции с СПГ оказались существенно больше, чем в варианте с песком, и достигли нескольких десятков суток (рис. 5.20, 5.21).

Моделирование ***интенсивности гравитационного стока*** дало также как и для впитывания влаги, значительные расхождения с экспериментальными данными (рис. 5.22). В случае колонны с песком более или менее адекватные результаты были получены лишь при использовании в модели минимальных величин коэффициентов фильтрации $К_ф$=190 см/сут. Предпочтительнее также оказалось использовать ОГХ, полученную методом колонн. Вместе с тем во всех вариантах моделирование сток быстро приближался к нулевой величине уже в течение первых суток, что находилось в хорошем соответствии с данными экспериментов, где сток прекращался за такое же время.

Для варианта почвенной конструкции с гидрогелем получились наибольшие расхождения между интенсивностями реального и моделируемого стока (рис. 5.22). Так при любых параметрах $К_ф$ в песке и гидрогеле от максимальных (430 см/сут и 2,9 см/сут) до минимальных (190см/сут и 1,5см/сут) модель прогнозировала весьма высокий сток в первые моменты времени, достигающий 100 см/сут и более, тогда как на самом деле он не превышал 0,1см/сут, то есть был практически на три

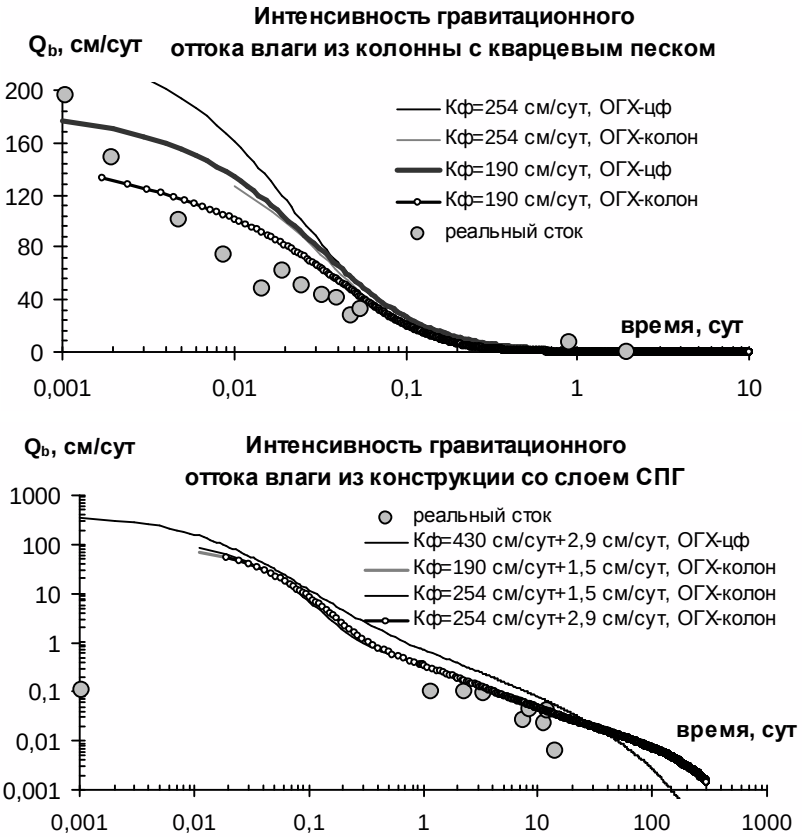


Рис. 5.22. Интенсивность гравитационного оттока влаги из колонны с песком и слоистой конструкции с 0,2% СПГ в сравнении с поливариантным моделированием этого процесса.

порядка ниже. Причиной подобных расхождений на наш взгляд может быть тот или иной алгоритм осреднения коэффициентов фильтрации в модели при переходе от слоя к слою, тогда как реально для контрастных структур с наличием слоев, на несколько порядков различающихся по влагопроводности, правильнее использовать принцип «наименьшего звена». То есть реально в такой системе интенсивность влагопереноса будет лимитироваться наименьшим коэффициентом фильтрации, в частности для нашего случая – значением $К_ф$ в

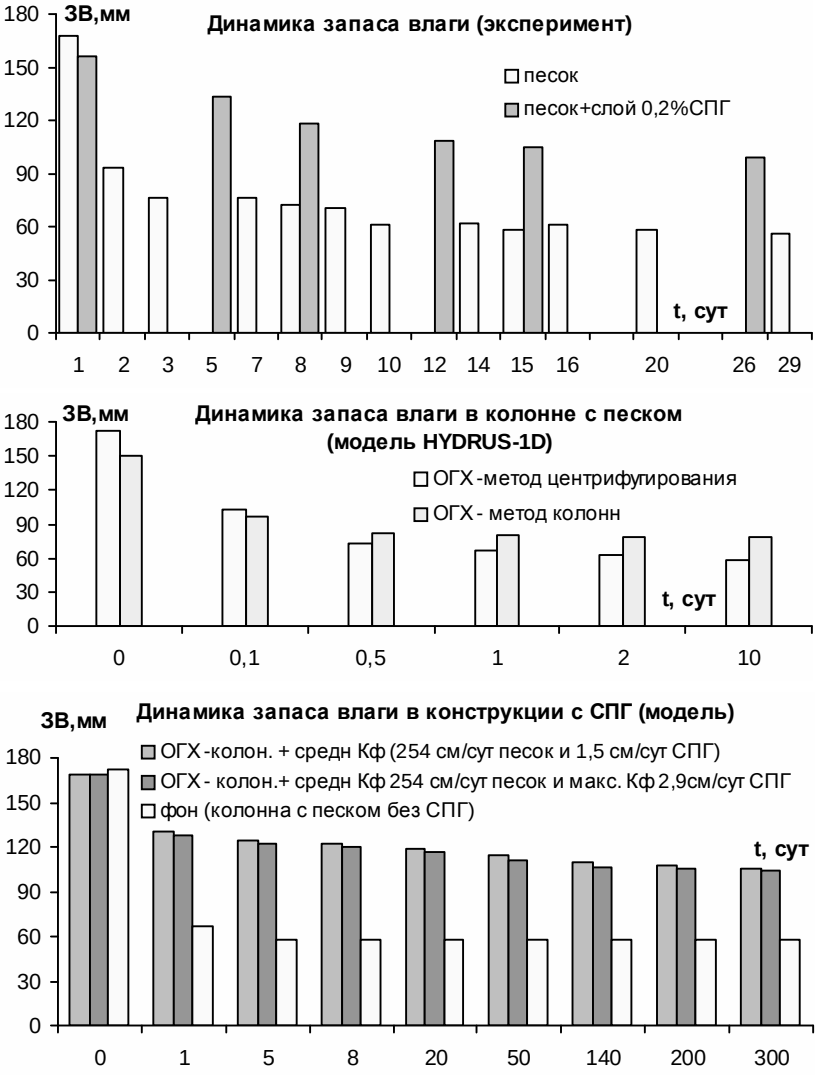


Рис. 5.23. Экспериментальные наблюдения и моделирование динамики запасов влаги в колонне с песком и слоистой конструкции на его основе с СПГ. **Аналитики А.А. Шитухина и А.В. Рачек.**

слое с гидрогелем (1,5-2,9 см/сут). Отсюда не может быть и стока с нижней границы с интенсивностью выше, чем указанные

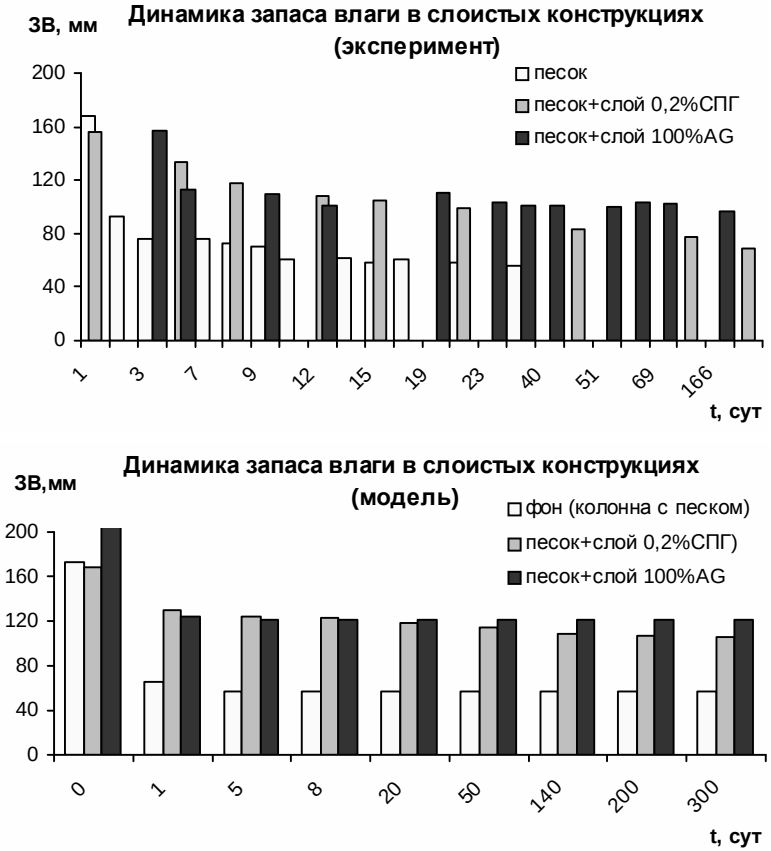


Рис. 5.24. Сопоставление экспериментальных и прогнозных результатов по водоудерживающей способности макетов слоистых почвенных конструкций при технологическом моделировании их параметров. **Аналитики А.А. Шитухина и А.В. Рачек.**

величины, иначе нарушится принцип неразрывности потоков.

Обратимся к иллюстрациям 5.23-5.24, на которых представлены результаты ***динамики запасов влаги*** в исследуемых распределенных системах и их моделирования. Как видно, здесь получено хорошее соответствие и на качественном и на количественном уровнях между моделью и экспериментальными данными. Запасы подвешенной влаги

«устанавливаются» где-то на 10^e сутки для колонны с песком и не меньше чем на 100^e сутки для варианта почвенной конструкции со слоем СПГ. При этом инвариантные (равновесные) запасы в слоистой почвенной конструкции почти вдвое превышают таковые для гомогенного песка. Этот результат, наиболее важным, поскольку подтверждает возможность двукратного увеличения влагоемкости в песке при добавлении небольших количеств СПГ, а значит, – и соответствующей экономии поливной влаги. Аналогичный итог получается и при использовании 10см слоя органогенного почвомодификатора «Arid Grow». Здесь наблюдается самая большая исходная влагоемкость конструкции из всех сравниваемых вариантах, достигающая 200мм (рис. 5.24). По прошествии 1-2 суток после оттока свободной гравитационной влаги устанавливается равновесное состояние с теоретически возможной величиной водоудерживания от 120мм и выше, то есть как и в случае с СПГ минимум вдвое больше, чем в исходном песке. Это состояние будет сохраняться неизменным сколь возможно долгое время, если исключить испарение и транспирацию влаги. Реальные данные были весьма близкими к прогнозным на первых этапах опыта (3-5сут), в течение которых поддерживался режим изоляции поверхности от испарения. В дальнейшем изолирующая пленка удалялась, и колонны экспонировались открытыми в комнатных условиях длительное время порядка 200 суток, поэтому запасы влаги несколько уменьшились относительно прогнозных по модели.

Для ускорения испарения влаги в течение первого месяца был осуществлен искусственный нагрев со средней температурой почвенной поверхности, варьирующей для разных макетов конструкций от 33,6 до 36,8 ^oC (рис. 5.25). Такой имитационный режим, очевидно, соответствовал условиям длительных (до 1 месяца) летних засух в мегаполисе. На фазе нагрева выявились различия в теплофизических свойствах исследуемых макетов конструктоземов. Так в колонне с кварцевым песком прогрев был сильнее и распространялся на всю глубину. В слоистых конструкциях наряду с подвешиванием влаги и увеличением теплоемкости верхнего слоя снижалась температуропроводность, поэтому слои оставались холоднее на ~3-4 градуса по сравнению с контролем.

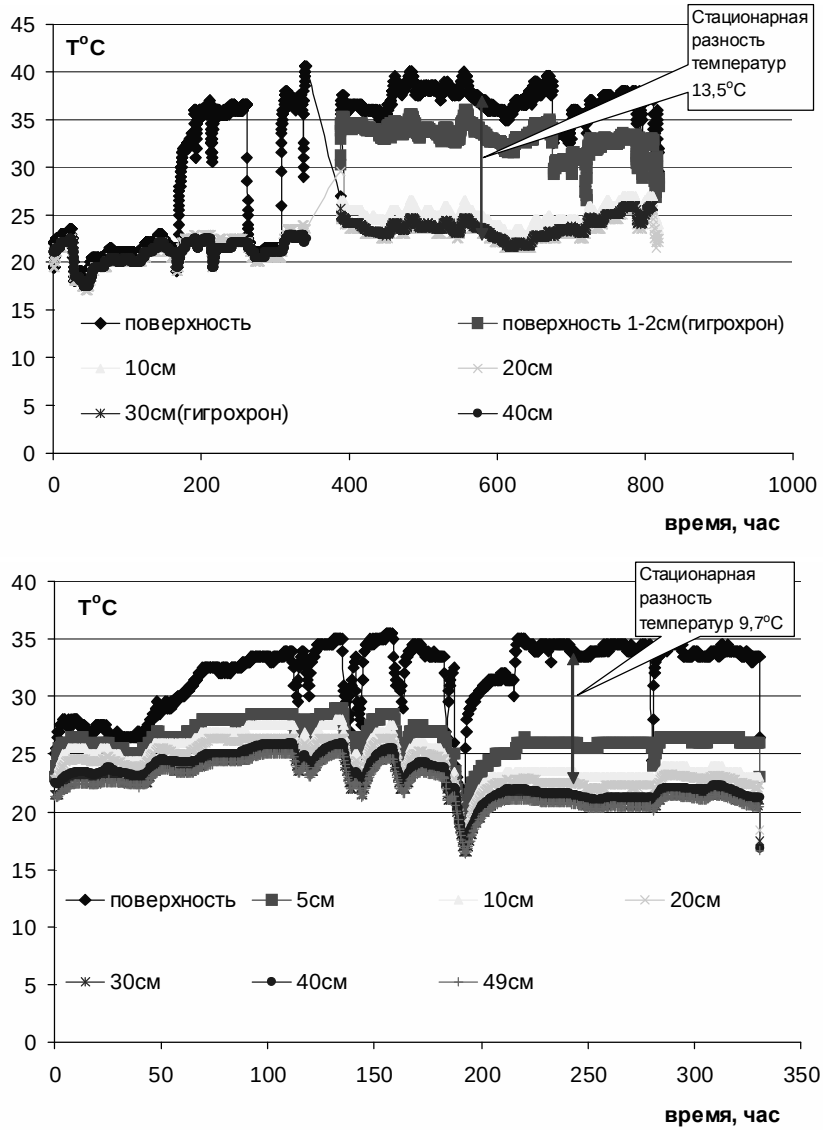


Рис. 5.25. Температурный режим в экспериментах с макетами почвенных конструкций: вверху – колонна с кварцевым песком (контроль), внизу – слоистая конструкция с 0,2% СПГ; стрелками показана стационарная разность средних значений температур поверхности и почвогрунта на глубине 20см в режиме нагрева.

Причем это были не абсолютные значения, а относительные в виде разницы между температурой поверхности и слоем почвогрунта на соответствующей глубине (см. стрелки на рис. 5.25), что нивелирует некоторые исходные различия вариантов нагрева поверхности, упомянутые выше. Повышенные теплоизолирующие и теплоемкостные свойства особенно важны для аридного климата южных стран или для засушливых сезонов в столичном мегаполиса, при которых снижение температуры конструктозема даже на несколько градусов может значительно облегчить существование растительности в условиях экстремальных температур.

Кроме того, подобные свойства слоистых конструктоземов способствуют консервации в них влаги и защите от физического испарения. Как видно из рисунков 5.23-5.24 запасы влаги в слоистых конструкциях почти не менялись в течение ~200 сут опыта, хотя поверхность колонн была открыта после окончания гравитационного оттока и даже нагревалась. Верхний песчаный слой быстро иссушился и перестал быть капиллярным проводником влаги, которая законсервировалась в следующем 10см аккумулятивном слое с почвенными кондиционерами. Теплоемкие и теплоизолирующие качества этого слоя не позволили ему сильно нагреться и начать усилено испарять воду посредством термодиффузии и термокапиллярно-менискового переноса. Тем самым цель сохранения в верхней корнеобитаемой толще влагу от непродуктивных потерь (гравитационный сток, испарение) в сделать поправку на температурный режим лаборатории, оптимальный для развития микрофлоры по сравнению с природными условиями, но в целом анализируемая оценка темпов биодеструкции близка к таковой для полученных ранее результатов в полевых и лабораторных условиях (рис. 4.36, 4.41, 5.12, 5.13). Напомним, что речь идет о деструкции органических компонентов отдельных (контрольных) образцов на поверхности, тогда как собственно биополимерные компоненты почвенных конструкций были удалены на расстояние от поверхности (перекрыты слоем песка в 5см, см. фото 7). В результате для них было выявлено значительное снижение интенсивности деструкции в соответствии с рассмотренными ранее теоретическими закономерностями, сформулированными

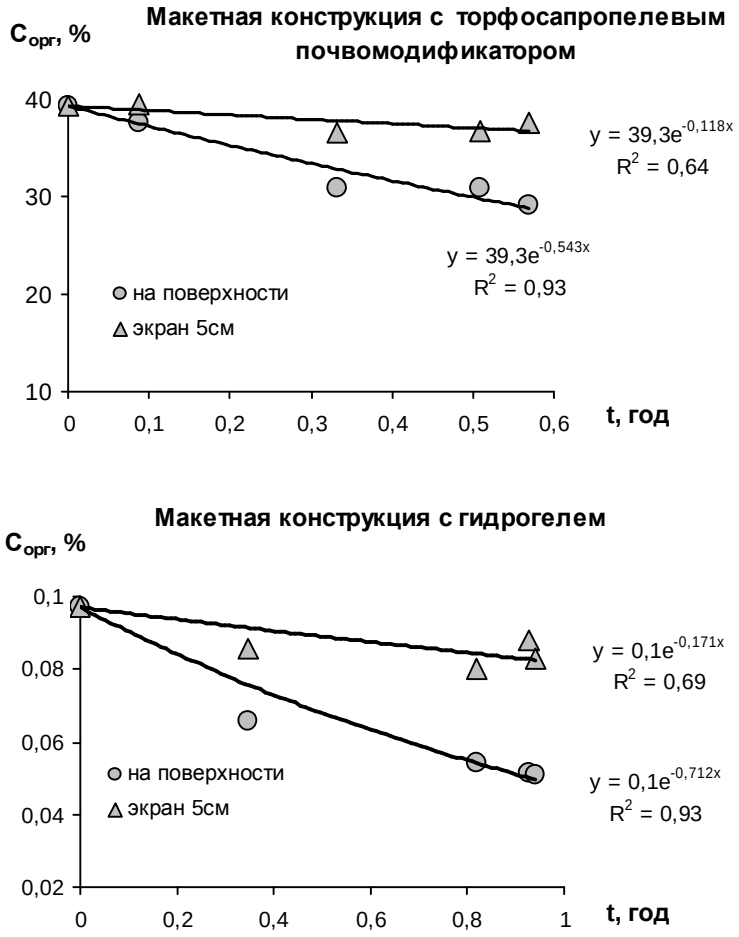


Рис. 5.26. Динамика содержания органического углерода органических кондиционеров в процессе лабораторного эксперимента с макетами почвенных конструкций

в § 5.3. Так уменьшение кинетических констант деструкции было 4-5 кратным, и соответствующие потери органического вещества за год снизились для торфосапропелевого почвомодификатора в 4 раза, а для СПГ в 3,2 раза. Заметим, что

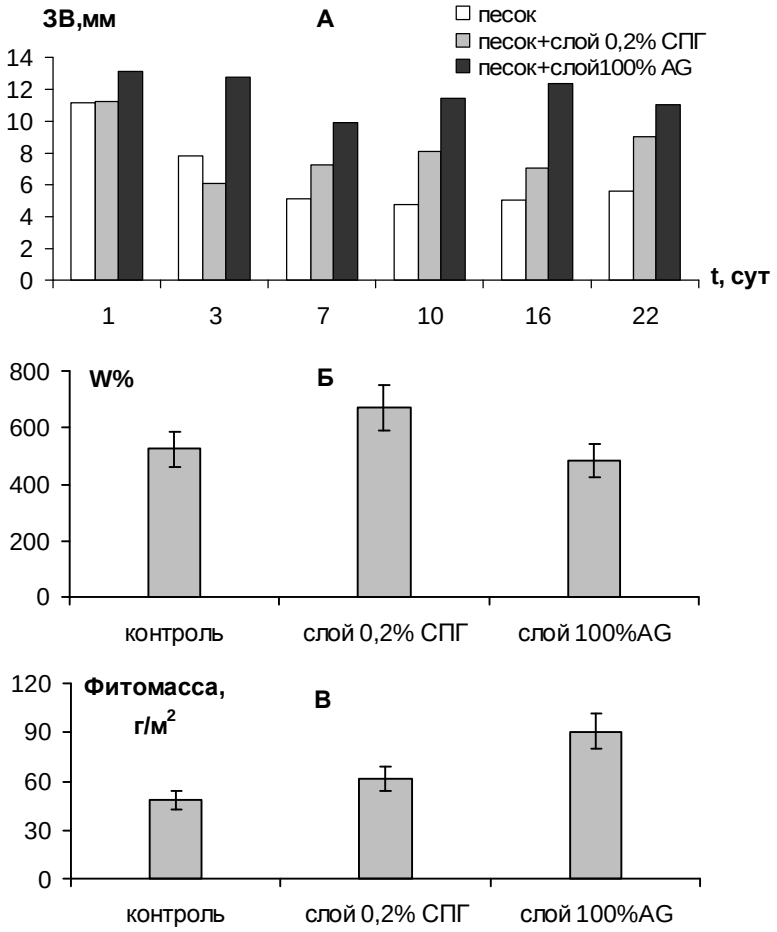


Рис. 5.27. Динамика запасов влаги в 0-10 поверхностном слое почвенных конструкций (А), влажность (Б) и фитомасса (В) газонной смеси.

предложенный выше теоретический метод номограмм (рис.5.15) позволяет вполне адекватно прогнозировать снижение темпов биодеструкции почвомодификаторов при экранировании их с поверхности слоем определенной мощности. Так при размерах слоя с кондиционерами в почвенных конструкциях в 10 см (см. фото 7), согласно нижней номограмме рис. 5.15, уменьшение

деструкции в случае 5-6 см экрана с поверхности будет 3-4 кратным, что и наблюдалось в действительности.

В завершении раздела приведем данные эксперимента с макетами почвенных конструкций, в котором осуществлялась посадка семян газонной смеси «Универсал» (по 2 грамма на каждую конструкцию), состоящей из: 30% райграса пастбищного, 30% овсяницы луговой и 40% тимофеевки луговой. Семена были смешаны с небольшим количеством торфа (20г), с целью ускорения их прорастания. Полив производился из расчета компенсации ежедневных потерь влаги на физическое испарение и транспирацию (от 2 до 4 мм/сут) одинаково для всех вариантов конструкции. На первых стадиях осуществлялся ежедневный полив с использованием пульверизатора для равномерного распределения влаги по поверхности и смачивания семян. Поскольку песчаный почвогрунт (контроль) находился исходно в воздушно-сухом состоянии, первые порции влаги концентрировались в нем в верхней толще, благодаря известному эффекту гидрофобности (несмачиваемости) сухого песка [Гаель, Смирнова, 99]. Такое «подвешивание» влаги временно обеспечило контрольному варианту фактически одинаковую влагоемкость верхней 0-10см зоны в сравнении со слоистыми почвенными конструкциями, в частности – с гидрогелем (рис. 5.27). По этой причине газонная растительность на первых этапах развивалась фактически одинаково во всех вариантах конструкций. Заметим, что мульчирование торфом приблизило контрольный вариант к традиционной в городе технологии озеленения с подсыпкой органогенных почвогрунтов на поверхность рекультивируемой территории. Зеленые всходы семян появились на девятые сутки от начала эксперимента и к концу второй недели опыта они достигли высоты 8-10см, приблизительно одинаковой во всех сравниваемых вариантах (см. фото 9 Приложения). Однако густота всходов была наибольшей в случае торфосапропелевого почвомодификатора. После первой недели эксперимента начали отчетливо проявляться различия в запасах влаги в 0-10 см слое макетов почвенных конструкций. Ежедневные поливы привели к промачиванию нижних горизонтов контрольного варианта, в результате чего «подвешенная» влага была «сброшена» из поверхностного слоя вглубь конструкции. Гидрогель и

органогенный почвомодификатор смогли удержать большую часть влаги благодаря повышенной влагоемкости (водоудерживающей способности) в корнеобитаемой поверхностной толще. Поэтому запасы влаги в этих конструкциях в слое 0-10см оказались в 1,3-1,6 раза (СПГ) и в 1,6-2,4 раза (торфосапропель) выше, чем на контроле (рис. 5.27-А).

В соответствии с запасами влаги стало происходить и дальнейшее развитие растительности, освоившей корнями верхний 10 см слой почвы. Контрольное скашивание фитомассы по прошествии 1 месяца эксперимента выявило определенные различия в пользу технологии слоистых почвенных конструкций (рис. 5.27-В). Так фитомасса на контроле составила в среднем 45,8 г/м^2, в конструкции с гидрогелем – 61,2 г/м^2, а с торфосапропелевым почвомодификатором – 90,4 г/м^2. Влажность растений оказалась максимальной для конструкции с гидрогелем (рис. 5.27-Б), что, может быть связано с ее повышенной доступностью для ювенильных корневых систем в этом виде почвенного кондиционера из-за низких абсолютных величин давления набухания СПГ [Лагутина, 96].

В целом, при варьировании некоторых несущественных деталей, в ходе реализации макетов слоистых почвенных конструкций на основе природных и синтетических почвомодифмикаторов было достигнуто полное соответствие проектных и реальных технологических характеристик, а именно – интегральной водоудерживающей способности конструктоземов в виде запасов влаги с которыми фактически напрямую связаны продуктивность и устойчивость функционирования зеленых насаждений. Оба типа конструкций позволяют удержать поступающую с поверхности влагу в верхней корнеобитаемой толще, значительно увеличивая ее влагоемкость, что на практике даст возможность газонной растительности на таких конструкциях выдерживать условия летних засух без дополнительного орошения, не снижая показатели продуктивности и качества фитомассы. В аридных условиях поливного земледелия можно значительно (до 2 раз и более) сократить расход ирригационной влаги и предотвратить вторичное засоления, блокируя его капиллярный механизм.

ГЛАВА 6. Почвенно-экологическая характеристика условий на объектах тестирования почвенных конструкций.

6.1. Характеристика зарубежных объектов исследования.

Проблема почвенного конструирования начала разрабатываться авторским коллективом ведущих специалистов МГУ в конце 90-х годов при финансовой поддержке ряда коммерческих организаций (ДИМКО ЛЛС, NOP-NASS, МНЦП ЮНЕПКОМА) в связи с реализацией ряда российско-арабских проектов устойчивого земледелия и ландскейпинга в аридных условиях высокоразвитых стран Персидского залива (О.А.Э., Бахрейн, Катар т.д.). Специфика условий столичного мегаполиса по ряду показателей приближается к таковой в аридном климате, что наглядно продемонстрировала небывалая засуха 2010 года. Засушливые условия, недостаток атмосферных осадков, экстремально-высокие температуры в летние месяцы часто вызывают серьезное угнетение и гибель городской растительности (см. главу 1). На этом фоне усугубляются проблемы техногенного и антропогенного загрязнения (засоления) отдельных городских территорий водорастворимыми формами загрязняющих веществ в виде солей противогололедных препаратов, тяжелых металлов и иных электролитов. При преимущественно восходящих потоках испаряющейся влаги в условиях засухи эти вещества аккумулируются в корнеобитаемой зоне и на поверхности почвы, вызывая угнетение роста и развития травянистой растительности, а также создавая угрозу здоровью населения при аэральном переносе с поверхности в атмосферу (пылении). Аналогичный механизм аккумуляции в аридных условиях получил название вторичного засоления и общепризнан как основной фактор деградации орошаемых земель во всем мире.

В связи с этим проведенные нами в аридных условиях эксперименты по тестированию влагоаккумулятивных слоистых почвенных конструкций с защитой от вторичного засоления можно рассматривать как основу для разработок последующего проекта для мегаполиса (Госконтракт ПМ № 8/3-66н-10). Отсюда первый раздел данной главы будет посвящен краткой почвенно-экологической характеристики объектов аридной климатической зоны, на которых первоначально отрабатывались

базовые варианты данной технологии с российскими материалами в виде торфяных и торфо-сапропелевых почвомодификаторов, а также сильнонабухающих полимерных гидрогелей (СПГ) на основе радиационно-сшитого полиакриламида.

Предварительные эксперименты по тестированию слоистых почвенных конструкций осуществлялись на опытных станциях озеленения муниципалитетов эмиратов Дубаи (О.А.Э.), Катара и королевства Бахрейн в 1995-2007 гг. Территории эмиратов расположены на берегу Персидского залива в юго-восточной части Аравийского полуострова. Королевство Бахрейн представляет собою остров в Персидском заливе в непосредственной близости от материковых земель (Саудовская Аравия, Катар) размерами соизмеримыми с современной Москвой в границах третьего транспортного кольца. Климат территорий пустынный с сухим сезоном более 4 месяцев при естественных осадках около 100 мм/год и экстремально высокими температурами (от 30^{o}C летом и от 15-20^{o}C зимой) в дневные часы. В экстремально жаркий период середины лета температура воздуха может превышать 60^{o}C отметки днем и снижаться до 25-30 оС в ночные часы (см. рис. 4.38, глава 4). Наличие вблизи морской акватории способствует постоянно высокой относительной влажности воздуха (более 90% в июне-августе), однако конденсация влаги незначительна из-за постоянно высоких температур воздуха. Макрорельеф не выражен, территория сложена приморскими, часто засоленными песчаными отложениями в виде невысоких (до 5-10м) дюнообразных повышений и равнинных участков.

Исходным грунтом, использующимся при выращивании растений в городских условиях, является тонкодисперсный пылеватый песок (табл. 6.1), способный агрегироваться по типу карбонатной цементации. Он обладает слабой водоудерживающей способностью и довольно высокой (220-240 см/сут) водопроницаемостью. Полная влагоемкость не превышает 26-28%. При этом как показывает анализ основной гидрофизической характеристики большая часть активной влаги (в диапазоне от 10-12 до 28%) не удерживается почвой и быстро стекает вниз. Примитивные пустынные почвы под скудной ксерофитно-солянковой растительностью отличаются

Табл.6.1. Характеристика дисперсности и состава твердой фазы пылевато-песчаной карбонатной пустынной почвы (эмират Дубаи, О.А.Э.)

Гори-зонт	Гу-мус%	Фракции, мм						S, $м^2/г$	ρ_b, $г/см^3$	ρ_s, $г/см^3$	Ec, дСм/м
		>0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001				
A	0,3	6,3	73,2	10,8	3,0	2,8	3,9	12,1	1,43	2,61	4,6
C	0,1	6,7	74,7	9,9	2,4	3,0	3,3	8,9	1,63	2,67	5,1

Примечание: S, ρ_b, ρ_s, Ec – удельная поверхность, плотности почвы и ее твердой фазы, электропроводность почвенной пасты.

недифференцированным профилем, коркообразованием, малым содержанием органического вещества (0,05-0,3%) и наличием глыбисто-конкреционных карбонатных скоплений и гипса с глубины 20-100 см.

Пылевато-песчаный гранулометрический состав отложений обуславливает развитие капиллярных явлений, способствующих поднятию засоленной влаги из глубинных горизонтов к поверхности при орошении почв. Именно этот фактор, как уже неоднократно отмечалось, является первопричиной процессов вторичного засоления и деградации орошаемых земель. На рис. 1.6 (см. главу 1) приведены данные по динамике засоления городских почвогрунтов, любезно предоставленные Министерством сельского и муниципального хозяйства королевства Бахрейн. Как видно за короткий срок активного орошения с использованием исходно чистых подземных вод, городские земли Бахрейна утратили свое качество и подверглись крайне интенсивному вторичному засолению (загрязнению) электролитами. Электропроводность почвенных паст варьирует от 2 до 8 дСм/м, что указывает на слабую и среднюю степень засоления грунта. На активно эксплуатируемых территориях в центре городских поселений формируется сильный уровень засоления (электропроводность более 16 дСм/м) и в этих условиях культурная растительность обречена на неизбежную гибель.

Для сравнения в нижней части рисунка 1.6 приведены данные по частоте встречаемости того или иного уровня засоления в почвах вдоль крупной автомагистрали столичного мегаполиса, полученные в 2001 гг, когда в городе активно использовались противогололедные препараты на основе

технической соли. Доминирующие в распределении величины электропроводности в 4-8 дСм/м фактически аналогичны таковым для Бахрейна. По-видимому, можно говорить о ***конвергенции антропогенного загрязнения*** (засоления) городских земель электролитами в полярно-противоположных климатических условиях.

Возвращаясь к характеристике аридных объектов, отметим, что в химическом составе используемой для полива или подмеса в оросительные системы воды (часто – рецайклинговые сточные воды, обогащенные нитратным и аммонийным азотом) отмечена большая доля катионов Na+ (400 ppm), что в условиях повышенной (до 50%) карбонатности грунта может быть причиной образования соли (Na_2CO_3) – наиболее токсичной для растений. Сходная проблема, опять таки может возникать в условиях столичного мегаполиса при взаимодействии технической соли (противогололедные препараты) с карбонатами аллохтонного генезиса (строительные материалы, пыль) и внутрипочвенного происхождения.

Очевидно, что в экстремальных температурных условиях при отсутствии атмосферных осадков выращивание растений (озеленение) возможно только на основе интенсивной ирригации. Принятые нормы орошения травяных зеленых газонов в муниципальной практике О.А.Э., Катара и Бахрейна составляют не менее 12 л/м^2 в сутки. В некоторых случаях нормы увеличиваются в 1,5-2 раза и более для лучшей приживаемости растений или их реанимации после засыхания. Уровень грунтовых вод на исследуемых территориях колеблется в среднем от 160 до 240 см от поверхности почвы. Значительная часть подземных вод к настоящему моменту сильно минерализована с содержанием солей до 20-30 г/л, хотя еще 10-20 лет назад, они были пригодны для питья и орошения.

Из древесной растительности доминирует финиковая пальма, вашингтония, акации, эвкалипты и казуарины, тамариски и тамаринды, конокарпусы, декоративные древесно-кустарничковые культурные растения (суданская роза, жасмин, олеандры, гранаты); естественный напочвенный покров спорадический (солянковые, полынь, осочки) и лишь в сезоны осадков может возникать ковер из эфемеров. При искусственном орошении (дождевании) в городских условиях

удается формировать сплошные газоны на базе таких растений, как бермудская трава (Bermuda grass), Паспалум (Paspalum vaginatum), Паспалум гибрид (Paspalum hybrid) и тд., представляющих собою злаковые и смешанные злаково-осочковые культуры, по большей части толерантные к высоким температурами, недостатку влаги и засолению. Капельное и струйное орошение с более экономным расходом воды применяется для древесно-кустарниковой растительности, почвопокровников и цветников (циннии, петунии, гвоздики, амарант, вербена, бальзамин, декоративный табак и т.д.).

Тестирование почвенных конструкций происходило в соответствии с соглашением о проведении таких работ с Министерствами сельского и муниципального хозяйств эмиратов Дубаи, Катара и королевства Бахрейн с организацией арабской стороной необходимых земельных работ по подготовке участка и закладки почвенных материалов. Российская сторона обеспечивала приобретение и доставку необходимых почвенных кондиционеров, проекты почвенных конструкций и научное сопровождение экспериментов по их тестированию.

Типичный размер участков в экспериментах с выращиванием травянистой растительности не превышал 0,1 га, что соизмеримо с обычными размерами сплошных газонов вдоль дорог и в селитебной зоне современных мегаполисов. Характеристика вариантов конструкций, последовательности работ по их реализации и используемых материалов содержится в главе №7 (см далее). Ниже приводится описание почвенного разреза городской почвы экспериментального участка муниципалитета Дубаи (дублер Абудаби-роуд, 2км от побережья Дубайского залива):

0-20 см. Верхний аккумулятивный горизонт. Серый пылеватый песок с охристыми пятнами, рыхлый, сыпучий, сухой; засохшие корни травянистой растительности;

20-50 см. Серый сухой песок, уплотнен, с обильными карбонатными конкрециями до 10-15см диаметром; инородные включения (строительный мусор, осколки стекла (видимо привозной грунт);

50-75 см. Более тонкий белесоватый однородный песок без включений, сыпучий, сухой;

75-160см. Уплотненный, структурированный довольно однородный желтовато-серый песок. На глубине 1м - выцветы солей, отдельные карбонатные конкреции, ниже – следы капиллярной каймы. Грунтовые воды вскрываются на глубине 160-170см, обладают щелочной реакцией (pH 8,1) и минерализованы (электропроводность 4,3 дСм/м, твердый остаток – 2-3 г/л).

В исследовании также задействованы материалы по использованию российских органогенных почвомодификаторов для локальных конструкций под капельное орошение на объектах Арабской Международной Кампании по развитию Сельского Хозяйства (AICAD) в Иордании. Тестирование технологий проводилось в 2008 г непосредственно специалистами AICAD при наших консультациях и рекомендациях. В отличие от стран Персидского залива территория Иордании находится в противоположной северо-западной части Аравийского полуострова и отличается более мягким субтропическим климатом с варьированием осадков от 100 до 700 мм/год, однако в летний период часты сильные засухи и без орошения выращивание культурной растительности практически невозможно. Почвенно-литологические условия также несколько отличны. В долине р. Иордан распространены довольно плодородные суглинистые почвы аллювиального генезиса, представляющие один из древнейших центров земледелия на планете. Вместе с тем непосредственный объект AICAD, на котором производились тестовые испытания расположен в континентальной части страны (на востоке от Аммана) на возвышенности, сложенной преимущественно легкосуглинистыми и пылевато-песчаными пустынными почвами с относительно невысокой водоудерживающей способностью и ярко-выраженными капиллярными эффектами, приводящими к значительным непродуктивным потерям оросительной влаги. Для такого класса почвенных объектов использование гигроскопичных органогенных материалов в виде локальных (луночных) конструкций под индивидуальное растение в сочетании с капельным орошением по нашему мнению могло дать существенную экономию водных ресурсов и прибавку в урожайности. Поскольку тестирование проходило не на

муниципальных, а на сельскохозяйственных объектах, растительные культуры здесь были представлены традиционно выращиваемыми в условиях открытого грунта сортами картофеля, томатов и сладкого перца.

6.2. Характеристика подмосковных объектов исследования (предварительные эксперименты)

Инициативные эксперименты по тестированию отдельных вариантов почвенных конструкций проводились в 2007 г в Учебно-опытном почвенно-экологическом центре МГУ «Чашниково». Центр расположен в Солнечногорском р-не Московской обл. недалеко от г. Зеленограда (43 км по шоссе Москва – Санкт Петербург). Поскольку Зеленоград относится к административно-территориальному делению г. Москвы, можно считать, данный объект пограничным по отношению к мегаполису. Климатические условия района характеризуются среднегодовой температурой порядка 3,5°С, безморозным периодом в 130-150 дней, уровнем осадков 600-670мм при испаряемости 450-550мм [Почвенно-агрономическая…86]. Осадки теплого полугодия превышают осадки холодного; в летнее время формируется положительный баланс с достаточным и нередко избыточным количеством влаги, однако в отдельные засушливые года может наблюдаться дефицит влаги и угнетение растительности. Общий рельеф местности пологоволнистый моренно-эрозионный и сочетает элементы вытянутых в юго-западном направлении всхолмлений с пологими склонами и плоских понижений, к которым часто приурочены небольшие водоемы и водотоки. Перепад высот редко превышает 10-15м. Водораздельная территория (междуречье) граничит с долинами рек Клязьмы и Сходни в которых развиты основные флювиальные формы рельефа от поймы до 4 террасы. Пойма Клязьмы в районе УОПЭЦ образует обширное расширение в правобережной части (1-1,5км), унаследованное от древнеозерной постледниковой котловины с мощными (до 3-4м) торфяными отложениями [Почвенно-агрономическая…86.]. Торф преимущественно древесно-осоковый низинного типа с 35-40% степенью разложения, плотностью 0,2-0,5 г/см^3, зольностью 7-15%, слоистый с

линзами и прослоями иловатых суглинков и крупными включениями в виде неразложившихся древесных остатков.

Материнскими и подстилающими породами водораздельных территорий служат покровные суглинки, средне и тяжелосуглинистая морена московского оледенения и гравелистые разнозернистые песчаные отложения флювиогляциального генезиса. Их различные сочетания и мощность определяются положением в рельефе, эрозионной деятельностью, а также глубиной сельскохозяйственной обработки почв. Агрохимические показатели плодородия невысоки и варьируют для верхних подпочвенных горизонтов покровных суглинков и морен в пределах 2-4 мг/100г P_2O_5 , 8-13 мг/100г K_2O, 9-16 мг-экв/100г обменных оснований при гидролитической кислотности 3-8 мг-экв/100г и pH 4,6-5,3. Естественная растительность на водоразделе и высоких террасах представлена высокобонитетными ельниками кисличными, сложными елово-дубовыми лесами с лещиной и неморальным широкотравьем, наряду со вторичными березняками и осинниками. Значительную часть долинного ландшафта занимают березово-еловые, березовые и березово-сероольховые фитоценозы, а также влажные лисохвостово-щучково-разнотравные пойменные луга и мелкотравные суходолы. Сельскохозяйственные пахотные угодья характеризуются зерновыми и зернобобовыми, а также пропашными культурами на разных стадиях севооборота. Их урожайность колеблется в зависимости от гидротермических условий, удобрения и способов обработки почв. Для дерново-подзолистых среднесуглинистых пахотных почв варьирование от обработки, известкования и внесения органических удобрений составляет по зерновым (озимая пшеница) – 20-35 ц/га, по травам – 45-85 ц/га, по клеверу – 40-80ц/га, по кукурузе на силос – 250-600 ц/га, по зернобобовым – 150-300 ц/га.

Почвенный покров УОПЭЦ «Чашниково» отличается пестротой и значительным разнообразием, как следствие различных сочетаний описанных выше факторов почвообразования. На водораздельной территории под лесом и сельскохозяйственными угодьями распространены дерново-подзолистые легко и среднесуглинистые (на вершинах холмов – супесчаные) почвы на покровных суглинках, подстилаемых

Табл. 6.2. Гранулометрический состав и физические свойства типичных почв УОПЭЦ МГУ «Чашниково»

Горизонты почвы	Кф, м/сут	Фракции, мм						$S_{БЭТ}$, $м^2/г$	r_b $г/см^3$	r_s $г/см^3$	НВ %
		> 0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001				
Дерново-слабоподзолистая супесчаная почва на флювиогляциальных песчаных отложениях, подстилаемых мореной (ельник-кисличник)											
A1	2,2	31,3	18,3	33,1	6,0	5,6	5,8	24,6	1,35	2,62	13,0
A1E	4,6	52,9	15,3	18,4	3,6	3,2	6,6	20,9	1,44	2,65	9,1
B	5,5	71,8	14,3	4,7	1,2	1,7	6,3	14,1	1,59	2,64	3,6
C	4,8	83,9	7,6	1,7	0,6	0,9	5,3	12,9	1,63	2,67	2,9
Дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая слабоокультуренная почва на флювиогляциальных песках, подстилаемых мореной (агроценоз)											
Апах	3,3	32,1	13,7	34,1	5,9	3,6	10,6	30,5	1,45	2,63	14,2
A1E	3,8	41,6	15,7	26,6	4,6	3,9	7,6	17,2	1,50	2,63	11,4
B	4,9	68,9	15,3	6,2	1,3	1,8	6,5	12,7	1,62	2,67	3,2
C	5,3	78,9	10,4	2,5	1,1	1,2	5,9	11,0	1,67	2,66	3,4
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая среднеокультуренная почва на покровных суглинках, подстилаемых мореной (агроценоз)											
Апах	1,4	3,8	12,4	53,8	9,4	11,8	8,8	43,0	1,34	2,62	26,4
A1E	2,2	3,6	13,9	55,6	10,6	8,6	7,7	39,7	1,42	2,64	20,3
B1	0,07	3,5	11,9	52,8	9,7	9,2	12,9	48,6	1,59	2,70	19,2
B2	0,15	4,6	14,9	47,3	9,2	11,9	12,1	53,8	1,68	2,70	18,0
C	0,17	16,7	29,6	19,6	5,9	8,7	19,5	66,5	1,73	2,66	17,2
Перегнойно-торфяная низинная освоенная почва (злаково-разнотравный луг)											
Ап	2,4	12,6	19,2	33,5	5,4	15,3	14,0	156	1,02	2,56	56,9
T	18,9	-	-	-	-	-	-	420	0,40	2,18	131
G	0,03	0,4	10,4	49,6	5,7	8,2	25,8	87,3	1,71	2,66	20,9

Примечание: $S_{БЭТ}$, ρ_b, ρ_s, НВ, Кф – удельная поверхность, плотности почвы и ее твердой фазы, наименьшая влагоемкость и коэффициент фильтрации.

мореной или флювиогляциальными отложениями. Пахотные и старопахотные почвы различной степени окультуренности часто

Табл.6.3. Агрохимические показатели плодородия дерново-подзолистых почв УОПЭЦ «Чашниково»

Горизонт почвы	Мощность горизонта, см	Гумус, %:	pH сол.	Гидрол. кислотность,	Сумма обменных оснований	P_2O_5	K_2O
				мгэкв/100г		подвижн., мг/100г	
Дерново-слабоподзолистая супесчаная почва на флювиогляциальных песчаных отложениях, подстилаемых мореной (ельник-кисличник)							
A1	0-8	1,8	3,9	4,1	6,3	5,2	8,1
A1E	8-17	0,5	4,2	1,2	4,0	1,9	3,3
B	30-50	0,1	4,7	1,6	2,8	1,7	4,2
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая среднеокультуренная почва на покровных суглинках, подстилаемых мореной (агроценоз)							
Апах	0-20	3,2	5,7	2,8	13,7	14,1	16,9
A1E	20-30	1,4	5,0	2,0	6,9	7,3	10,1
B1	40-50	0,3	4,7	7,1	10,4	3,8	9,2

подвержены эрозионным процессам, поэтому на вершинах холмов доминируют неглубоко и слабоподзолистые смытые, а в понижениях – глубокоподзолистые оглеенные намытые почвы [Почвенно-агрономическая…86].

Структура профиля лесных почв (A0)-Ad-E-EB-B(B1,B2)-BC-C-(D), пахотных – Апах-E(AE)-EB-B(B1,B2)-BC-C-(D), при мощности аккумулятивных горизонтов 15-30см и подзолистых 10-20см. В таблицах 6.2, 6.3 приводится гранулометрический состав и агрохимические характеристики наиболее часто встречающихся вариантов дерново-подзолистых почв (среднестатистические данные).

В долинной части УОПЭЦ преобладают болотные низинные торфяные и торфяно-глеевые, а также перегнойно-торфяные и перегнойно-глеевые низинные освоенные почвы. Последние получили развитие после осушительной мелиорации и сельскохозяйственного использования пойменной территории, начатых в 70х годах прошедшего столетия. В настоящее время их свойства претерпели значительные изменения относительно исходных болотных почв в направление уплотнения, снижения водопроницаемости, увеличения степени разложения и

гумификации органического материала. В результате в верхней части профиля формируется специфический перегнойно-торфяный горизонт с зернистой структурой, хорошими физическими свойствами при высокой дисперсности (150-300м^2/г), водоудерживающей (60-70 % об.) и поглотительной способности (150-200мгэкв/100г) (табл. 6.2). Модифицированный органогенный материал этих почв в виде торфонавозного компоста был использован при создании влагоаккумулятивного слоя почвенных конструкций в УОПЭЦ МГУ «Чашниково».

Эксперимент по тестированию водоудерживающей способности почвенных конструкций проводился на предварительно выровненном участке залежи с дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой слабоокультуренной почвой на флювиогляциальных песках, подстилаемых мореной. Подобная текстурная организация с доминированием облегченного гранулометрического состава в верхней метровой толще почвенного профиля является весьма распространенной в условиях столичного мегаполиса (см. сл. раздел). Отсюда и типичные для города проблемы, связанные с такого рода почвами – недостаток влаги в засушливое время года и питательных элементов из-за низкой водоудерживающей и поглотительной способности почв (НВ 10-15%, емкость поглощения 4-6 мг-экв/100г). Поэтому почвенные конструкции на такой основе должны в первую очередь быть направлены на оптимизацию этих неблагоприятных качеств исходных почв. Ниже приводится полевое описание основных горизонтов разреза исходной почвы на экспериментальном участке:

Апах (0-25 (30)см). Свежий буровато-серый легкий суглинок (местами – супесь), рыхлый, структура комковато-порошистая, обилие корней, переход резкий по цвету, гранулометрическому составу, граница ровная;

ЕВ (30-35 (40)см). Свежий палевый с охристыми пятнами, отмытыми зернами кварца плотный песок с каменистыми включениями, значительно меньше корней, переход ясный по цвету, граница неровная (затечная);

$B_{h,fe}$ (40-100 см). Влажноватый охристо-бурый твердый грубозернистый песок с железисто-гумусовой цементацией в виде отдельных пятен (стяжений) грубодисперсного материала,

вкрапления глинистого материала наряду с обилием каменистых включений, часто подверженных сильному выветриванию (распадаются на зерна при нажатии), отдельные корни.

6.3. Характеристика объектов исследования г. Москвы.

Москва расположена в центральной таежно-лесной области бореального пояса и ее климатические условия относятся к умеренно-континентальным. Положительная температура воздуха наблюдается в среднем в течение 194 суток, отрицательная – на протяжении 103 суток. Средняя годовая амплитуда температуры воздуха составляет 28°С. Годовые суммы осадков колеблются в среднем в пределах 540-650 мм, среднегодовая продолжительность осадков различной обеспеченности составляет 1777 из 8760 часов. Число часов солнечного сияния в год – 1568 [Климат Москвы, 1989].

Длительность зимнего периода составляет 160-170 дней. Зимой в Москве часто наблюдаются оттепели. По данным Метеорологической обсерватории МГУ за сезон насчитывается около 58 дней с оттепелью. Наиболее часто оттепели отмечаются при температуре воздуха 0,1-1,0°С (50%), реже при 1,1-2,0°С и редко при 3°С и более (1%) Снежный покров устанавливается, как правило, в конце ноября, а окончательно сходит в начале второй декады апреля. За зиму в городе бывает 50 и более снегопадов, а также 50–60 циклов перехода температуры воздуха через 0 ^{o}С.

Антропогенное влияние на городскую среду выразилось в изменении климатических характеристик. Климатические характеристики: естественный ход температуры, распределение осадков, влажности, солнечного сияния и другие метеорологические элементы значительно изменяются с увеличением площади и этажности застройки. Возникающий над городом «остров тепла» выражен в Москве весьма отчетливо, в результате чего температура в целом по городу на 1,5-2°С выше, чем в окрестностях, что как бы «смещает» территорию Москвы на 150-200 км к югу [Полякова, 2000]. Наши более поздние исследования, относящиеся к 2003-2004 гг, и использующие технику полностью автоматизированного

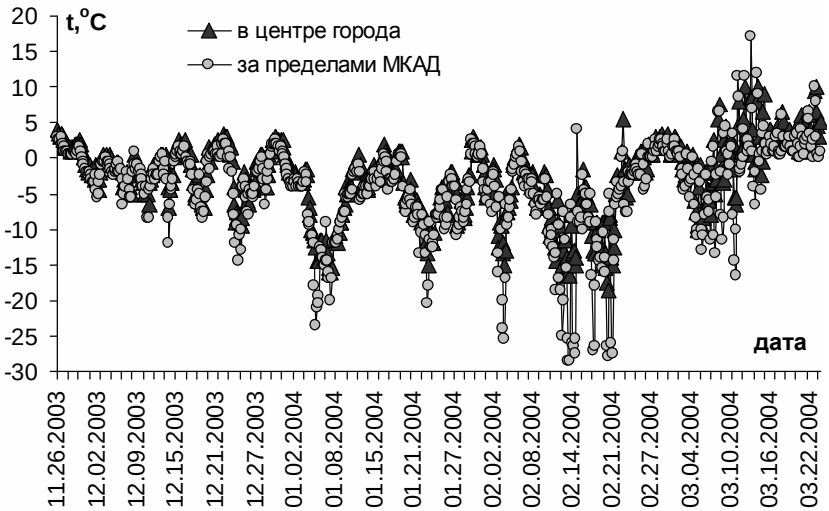


Рис. 6.1. Автоматизированный мониторинг температуры воздуха в долине р.Сетунь в холодный период года.

мониторинга температуры окружающей среды с помощью программируемых мини-сенсоров [Смагин и др., 2006], подтвердили это положение (рис. 6.1, см. также главу 1). Так средняя температура атмосферы за холодный период с ноября по март по двум реперным точкам в долине р.Сетунь на входе в город (за пределами МКАД, Заречье) и в устье (1-й Сетуньский проезд) отличалась на 1,3 ^{o}C (- 4,1 против -2,8^{o}C). При этом различия в экстремальных температурах были куда значительнее. Минимальная температура за пределами МКАД (-28,5^{o}C) была на 10 градусов ниже таковой в центре города (-18,5^{o}C); при этом подобные различия неоднократно повторялись в течение периода наблюдений (рис. 6.1).

В городе выпадает на 5-10% больше осадков по сравнению с окружающей территорией, уровень солнечной радиации, достигающей земли на 15-30% меньше, средняя скорость ветра на 20-30% ниже, зимой наблюдается вдвое больше туманов. В последнее десятилетие в холодный период года проявляется тенденция увеличения повторяемости периодов с относительной влажностью воздуха более 70 % и

сравнительно высокой для зимы температурой воздуха (выше 0 ^{o}C), что отрицательно влияет на состояние дорог, зданий, сооружений. Температура поверхности почвы на 1-2^{o}C(до 10^{o}C) выше, чем на окружающей местности. Изнутри почвы подогреваются городской теплосетью, причем разница температур почвы над теплотрассами и вне их в зимний период достигает 5-10 градусов и более (см. рис. 1.7, глава 1). В городе происходит ранний сход снега (в отдельные годы снежный покров держится всего 3-4 месяца), увеличивается вегетационный период. По абсолютным величинам в городе выпадает больше осадков, чем во внегородских территориях, но реально в почву их попадает меньше из-за сброса дождевой воды в коллекторы и уборки снега [Рекомендации…90, Почва, город, экология, 97, Смагин и др.,2006]. К этому добавляется повсеместная тенденция аридизации, сказывающаяся на климате мегаполиса в виде регулярно повторяющихся летних засух. В 2007 г засуха с дефицитом осадков и недостатком почвенной влаги длилась около месяца, а в текущем 2010 году – порядка двух месяцев, что привело к отмиранию вегетативной массы зеленых газонов, части кустарников и даже древесных культур столичного мегаполиса. В целом, эффект «острова тепла», глобальные климатические изменения и иные антропогенные причины приводят к увеличению температур, особенно экстремальных, достигающих в отдельные годы в летний период 30-40^{o}C и более, а также синхронному дефициту влаги, который может продолжаться в течение месяца и более. Эти факты приближают проблемы в озеленении столичного мегаполиса к таковым в аридных климатических условиях, наряду с рассмотренной ранее тенденцией загрязнения (засоления) растворимыми формами поллютантов-электролитов.

Рассмотрим литолого-геоморфологические условия мегаполиса, а также характеристику отложений его культурного слоя в контексте задач почвенного конструирования. Данные по описанию геологического строения и истории геологического развития территории г. Москвы содержатся в монографии «Москва: геология и город», подготовленной авторским коллективом под редакцией В.И. Осипова и О.П. Медведева [1997] и основанный на материалах исследований специализированных организаций «ГеоцентрМосква»;

Мосгоргеотрест; ГПП «Аэрогеология»; ПГО «Гидроспецгеология»; Метрогипротранс; ВСЕГИНГЕО; ПНИИИС Госстроя России; научными институтами РАН, МГГА; МГУ им. М.В. Ломоносова. Также, обобщающие сведения о физико-географических условиях города Москвы и влиянии на них деятельности человека представлены в книге «Почва, город, экология» под общей редакцией академика РАН Г.В. Добровольского [1997].

Москва и ее окрестности расположены на стыке Смоленско-Московской возвышенности, Москворецко-Окской равнины и Мещерской низменности. Северная часть города находится на южном крае склона Клинско-Дмитровской гряды Смоленско-Московской возвышенности и охватывает водоразделы рек Москвы, Клязьмы и Яузы. Рельеф этой местности представляет всхолмленную равнину с относительными высотами 40-55 м, сложенную в основном песками и моренными глинами. Природный рельеф северной части стал более пологим за счет засыпки грунтом оврагов и заболоченных понижений. Мощность толщи насыпных грунтов колеблется от 3 до 6 м.

Южная часть города охватывает междуречье Москвы и Пахры. Наиболее возвышенной частью южной области с превышением 130-135 м над урезом реки является Теплостанская возвышенность. Высота возвышенности достигает 200 м над уровнем моря и более 80 метров над урезом р. Москвы, круто обрываясь к реке, она образует Воробьевы горы. Рельеф возвышенности волнистый, расчлененный эрозионными долинами, балками и оврагами. При строительстве в этих местах были произведены значительные срезки и подсыпки грунта. Наиболее изменен рельеф в долинах малых рек: Раменки, Кровянки, Котловки, Чертановки и Городни. В долине р. Кровянки засыпано 85% овражно-балочной сети, а мощность антропогенных отложений достигает 20 м. Мощность насыпных грунтов между проспектами Мичуринский и Вернадского достигает максимальных для города величин за счет засыпки глубоких оврагов.

Восточная часть Москвы относится к окраине Мещерской равнины. Рельеф этой территории представляет собой плоскую, местами заболоченную равнину с высотными отметками,

поднимающимися выше 20-40 м над урезом р. Москвы. Восточные и юго-восточные части центра города примыкают к Мещерской низменности, это самые низкие и плоские части его рельефа. Здесь берут свое начало р. Пехорка и Яуза. В процессе освоения этой территории толщина насыпных грунтов имеет мощность 6 метров. Несмотря на проведенное в результате подсыпки поднятие дневной поверхности территория характеризуется неглубоким залеганием грунтовых вод и высокой степенью подтопления.

Долина р. Москвы занимает более 30% территории города. Река промыла широкую долину с тремя террасами – более молодой 1-ой надпойменной Серебряноборской и двумя более древними Мневниковской и Ходынской. Особенно большое пространство занимает 3-я Ходынская надпойменная терраса. В пределах города долина имеет ассиметричное строение.

В долине р. Москвы произошли наибольшие изменения рельефа. Сооружения в верхнем течение реки системы водохранилищ и водоканала Москва-Волга увеличило расход воды на 1 куб. км, что составляет 60% речного стока. Это привело к поднятию уровня воды на 5 м и частичному затоплению поймы. Постепенно были засыпаны овраги и промоины, раскрывавшиеся к долине реки. Малые реки в их устьевой части заключены в коллекторы (Ольховка, Неглинка и др.). В долинах рек Ходынки, Пресни, Неглинной полностью уничтожена гидросеть и овражно-балочная сеть. Мощность насыпных грунтов в долинах до 20 м. В результате хозяйственной и строительной деятельности происходит изменение рельефа территории Москвы. С одной стороны, наблюдается нивелирование форм исходного волнистого рельефа города: засыпание оврагов и пойм, срезание холмов и склонов, укладка мелких речек в подземные трубы. Особенно значительно изменение рельефа произошло при строительстве метрополитена в 1930-1960-е г., когда засыпались овраги и нивелировались понижения песчано-суглинистым моренным материалом, взятым с глубины 20-50 м. при прокладки шахт и туннелей. С другой стороны в направлении от периферии к центру города рельеф становится более приподнятым за счет накопления культурного слоя, средняя мощность которого

Табл. 6.4. Состав культурного слоя г. Москвы (из кн. [Почва, город, экология, 97]

пески	67,6
супеси	10,0
щебень и строительный мусор	10,0
суглинки	3,8
глина	1,2
органические компоненты	3,0
древние сооружения	4,4

составляет 3-5м, а максимальная – 20 м (Васильевский спуск) [Почва, город, экология, 97]. Состав культурного слоя преимущественно легкий с доминированием песков, супесей и каменистых инородных включений (табл. 6.4).

Анализируя картосхему почв и почвенно-грунтовых отложений г.Москвы, составленную специалистами МГУ на основе геоморфологических, литологических данных и непосредственных полевых исследований поверхностного слоя [Почва, город, экология, 97, Строганова, 97] можно выделить 4 основных типа территорий:

I. Холмистая полого-увалистая равнина, сложенная моренными и покровными суглинками с преобладанием урбаноземов, нарушенных дерново-(урбо)подзолистых почв и индустриземов на моренных, покровных суглинках и насыпных (привозных) грунтах;

II. Древняя плоская водноледниковая равнина, сложенная флювиогляциальными песчано-супесчаными, легкосуглинистыми отложениями с урбаноземами, дерново-(урбо)подзолистыми почвами и индустриземами на флювиогляциальных песках и супесях, насыпных (привозных) грунтах.

III. Надпойменные террасы р. Москвы, сложенные песчано-супесчаными отложениями с перекрытием или подстиланием покровными суглинками с урбаноземами, дерново-(урбо)подзолистыми почвами и индустриземами на песках и супесях, покровных суглинках, двучленных отложениях, насыпных (привозных) грунтах

IV. Пойма р. Москвы и ее притоков с урбаноземами

и индустриземами, аллювиально-дерновыми, луговыми почвами на естественных слоистых песчано – супесчаных отложениях (аллювии), насыпном грунте или культурном слое.

Резюмируя данные картосхемы, состава культурного слоя (табл. 6.4) и приведенные выше источники, можно заключить, что в г. Москве, по-видимому, ***доминируют почвы и почвогрунты легкого гранулометрического состава***, что опять таки сближает почвенно-литологические условия северного мегаполиса с таковыми в аридных областях. Это важнейшее заключение должно учитываться в контексте рассматриваемой проблемы почвенного конструирования и выборе типичного участка для реализации вариантов городских почвенных конструкций для устойчивого озеленения и благоустройства территорий. Очевидно, ***основной объект*** по тестированию почвенных конструкций должен отражать доминирующий в составе мегаполиса класс почвенных объектов легкого гранулометрического состава, типичных для ландшафтообразующего долинного комплекса р. Москвы (типы территорий II-IV). Поэтому в качестве такого объекта был выбран участок в составе Серебряноборского опытного лесничества (ул. Крылатская, ЗАО г. Москвы) на второй надпойменной террасе, сложенной песчано-супесчаными отложениями. Территория участка подвергалась ранее культурному освоению в качестве подсобного огородного хозяйства на территории лесничества (до 90-х годов), но впоследствии была заброшена. Его состояние отражают фотографии, сделанные до начала строительства почвенных конструкций по Госконтроакту ПМ № 8/3-66н-10 (иллюстрация 10, см Приложение). В начале века окружающие участок постройки были снесены, в результате чего в культурный слой почвы попал инородный материал в виде строительного мусора. В течение последних 3-4 лет поперек участка была проложена грунтовая дорога для проезда тяжелого мусоровоза к съемному контейнеру, что привело к дополнительной нагрузке в виде уплотнения и загрязнения территории. Участок расположен на склоне небольшой крутизны по направлению к ручью «Гнилуша», впадающего в Москву-реку. На момент проведения работ по конструированию почв ручей полностью пересох. С северной части границей участка является лесной массив

Серебряноборского опытного лесничества, с южной – асфальтированная дорога, ведущая к административным корпусам лесничества, с восточной – Крылатская улица, а с западной – административные здания и дворовая территория. Ниже приводится полевое описание базового почвенного разреза на территории опытного участка:

L (0-1см) Фрагментарно выраженный горизонт из остатков опада липы, сосны, трав текущего года, а также мусора с прилегающих урбаногенных территорий;

A1 (0(1)-25(30)см) Серый, гумусированный горизонт, супесчаный, комковатой структуры (комки непрочные, от 0,5-1 до 2-3 см в диаметре, при сдавливании рассыпаются, локализуются преимущественно по корням травянистой растительности); сухой, сложение в целом рыхлое (местами сильное уплотнение от колеи грунтовой дороги), обилие корней, семян, инородные антропогенные включения (битый кирпич, шлаки, стекло, иной строительный мусор), переход ясный, граница ровная (с затеками) по цвету;

E (30-40(50)см) Белесо-палевый (розоватый) с редкими серыми пятнами и затеками, сухой, уплотненный песок, резкое уменьшение корней по сравнению с горизонтом A1, значительно меньше структурных отдельностей (комков, глыбок) при увеличении их размеров и уменьшении прочности. Переход ясный, граница волнистая по цвету;

$B_{h,fe}$ (50-80 см) Плотный, с крупными комками органоминеральной железистой цементации, свежий, буровато-желтый песок, отдельные корни. Переход неясный, постепенный, граница неровная по цвету, сложению;

C (100-200см) Желто-серый, свежий песок, сложение более рыхлое, чем в горизонте B, практически отсутствуют структурные комки (связность), очень редкие корни.

Почва участка была определена как окультуренная дерново-(урбо)подзолистая на песчано-супесчаных отложениях аллювиального генезиса. Ее основные физические и химические свойства приведены в таблицах 6.5 и 6.6. Верхний гумусово-аккумулятивный горизонт имеет большую мощность, супесчаный гранулометрический состав с высоким содержанием органического вещества, что, вероятно, отражает не только естественные почвообразовательные процессы, но и позитивное

Табл. 6.5. Гранулометрический состав и физические свойства почвы экспериментального участка в ЗАО

Горизонт	Фракции, мм						S_s, $м^2/г$	r_b $г/см^3$	r_s $г/см^3$	Ec дСм/м
	>0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005-0,001	< 0,001				
A1	52	17,2	14,7	4,2	5,5	6,4	29,8	0,93	2,62	0,6
E	56,4	14,6	23,3	1,4	2,7	1,6	9,61	1,38	2,66	0,3
$B_{h,fe}$	49,6	31,3	11,1	2,8	1,9	3,3	14,9	1,54	2,73	0,4
C	73,8	22,1	1,5	0,4	0,3	1,9	4,80	1,61	2,67	0,2

Примечание: S_s, ρ_b, ρ_s, Ec – удельная поверхность, плотности почвы и ее твердой фазы, электропроводность насыщенного почвенного раствора.

Табл.6. 6. Характеристика агрохимических свойств почвы экспериментального участка в ЗАО

Горизонт	Гумус %	N %	P_2O_5 %	Обменные, мг-экв/100г		pH водн
				Ca^{2+}	Mg^{2+}	
A1	4,57	0,46	0,13	4,00	2,23	6,10
E	0,40	0,06	0,03	0,80	0,70	4,77
$B_{h,fe}$	0,67	0,08	0,06	2,53	1,33	5,30
C	0,07	0,02	0,03	1,10	0,73	5,43

Табл.6. 7. Характеристика химических свойств почвы экспериментального участка в ЗАО

Горизонт	Тяжелые металлы, мг/кг (вал)							3,4 бенз(а)-пирен, мг/кг	нефтепродукты, мг/кг
	Zn	Pb	Cr	Ni	Cu	Hg	Cd		
A1	65	36	61	30	50	1,5	0,2	0,033	630
E	28	18	38	13	22	0,8	0,2	0,031	580
$B_{h,fe}$	37	20	51	18	35	0,7	0,1	0,012	230
C	25	16	45	20	18	0,5	0,1	0,008	110

антропогенное воздействие в виде окультуривания этой почвы. В нем отмечаются достаточно высокие для данного класса почв агрохимические показатели актуального плодородия на фоне большой удельной поверхности и, соответственно, поглотительной способности. Эллювиально-иллювиальная дифференциация профиля приводит к образованию еще одного (второстепенного) депо биофильных элементовна глубине порядка 50см в виде горизонта $B_{h,fe}$.

Анализ химического загрязнения почвы экспериментального участка по валовым формам тяжелых металлов выявил следующее. Максимальные значения концентраций поллютантов приурочены к верхнему (0-5см) слою гумусово-аккумулятивного горизонта и достигают для цинка – 65мг/кг, свинца – 36 мг/кг, хрома 60 мг/кг, никеля – 30 мг/кг, меди – 50 мг/кг, ртути – 1,5 мг/кг и кадмия – 0,2 мг/кг (табл. 6.7). С глубиной содержание загрязняющих элементов закономерно снижается, что свидетельствует о поверхностном источнике ее загрязнения. Если использовать самые жесткие нормативы качества в виде ПДК (или ОДК для песчаных и супесчаных почв), регламентированных федеральным законодательством (ГН 2.1.7.2041-06 и ГН 2.1.7.2042-06), оказывается, что по многим показателям почва находится на границе допустимого уровня загрязнения или даже превышает его. Такая ситуация, несмотря на периферийное положение участка по отношению к центру мегаполиса может быть вызвана рядом причин: близостью автомагистралей, включая МКАД (≈1,5 км со стороны доминирующих ветровоздушных потоков), наличием в непосредственной близости районной ТЭЦ, возможно распространением мусора от близлежащего съемного контейнера, а также интенсивным использованием навозных удобрений и золы в период окультуривания почвы под огород. Кроме солей тяжелых металлов других форм загрязнения минеральными водорастворимыми поллютантами (электролитами) выявлено не было, о чем свидетельствуют невысокие значения электропроводности порового раствора в состоянии полной влагоемкости (насыщения влагой), не превышающие 0,6 дСм/м (табл. 6.5).

Из органических загрязнителей в аккумулятивном слое выявлен повышенный уровень нефтепродуктов (630 мг/кг) и бенз(а)-пирена (0,033 мг/кг), что, по-видимому, связано с непосредственной близостью от участка (≈20 м) складского помещения для хранения нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов, использующихся для техники Серебряноборского опытного лесничества и местной котельной. Вместе с тем на наш взгляд проблема загрязнения органическими поллютантами не является столь существенной, как в случае минеральных веществ, поскольку в почвах легкого гранулометрического

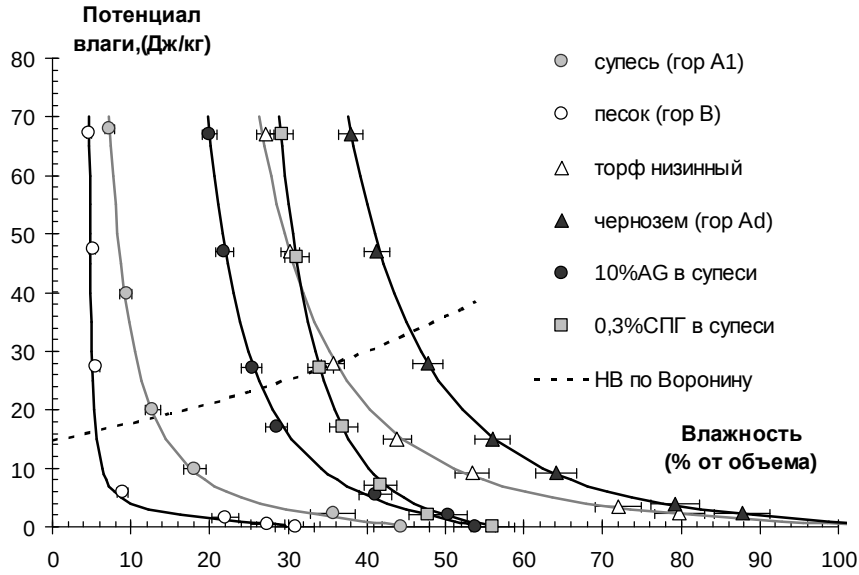


Рис. 6.2. Водоудерживающая способность почвенных субстратов объекта и их композиций с кондиционерами..

состава биодеструкция органических веществ происходит довольно быстро, и при ее стимулировании специальными препаратами можно очистить почву без каких либо трудоемких процедур по реплантации (извлечения) загрязненных масс.

Отметим, что уровень загрязнения почвы хоть и является довольно высоким с позиций санитарно-гигиенической обстановки, на газонную растительность угнетающего воздействия он оказать не может, поскольку для этого нужны на порядок более высокие концентрации поллютантов. Поэтому на первое место здесь выходят неблагоприятные физические и физико-химические свойства, а именно – низкая водоудерживающая и поглотительная способности почв легкого гранулометрического состава, что и должно учитываться в проекте почвенных конструкций на данной территории. В главе 4 анализировались основные гидрофизические характеристики (ОГХ) песчаных и супесчаных почв в исходном состоянии и под воздействием биополимерных почвомодификаторов. На рисунке

6.2 приведены ряд ОГХ исследуемых образцов в сравнении с водоудерживающей способностью низинного торфа (Яхромская пойма, Подмосковье) и чернозема типичного (Харьковская обл.). Для удобства сравнительной оценки использован метод секущих ОГХ по Воронину [Воронин, 84]. Пунктирная линия на рисунке соответствует потенциалу влаги при наименьшей влагоемкости, поэтому пересечение этой линии с кривой ОГХ для данного почвогрунта (композиции) позволяет оценить величину водоудерживающей способности в виде НВ, – состояния почвы после оттока гравитационной влаги. Как видно НВ песчаного горизонта не превышает 6% содержания влаги от объема почвы. Для супеси (верхний гумусовый горизонт) эта величина несколько выше (12-13%), но также характеризует слабую водоудерживающую способность. По сравнению с торфом (37-38%) и черноземом (48%) эта водоудерживание супесчаного горизонта дерново-(урбо)подзолистой почвы экспериментального участка в 3-4 раза ниже.

Вместе с тем данное негативное свойство можно изменить, используя добавки биополимерных почвенных модификаторов. Так 10% смесь супеси с почвенным кондиционером AridGrow (AG) на основе диспергированного торфо-сапропелевого сырья [Smagin et.al., 2005] характеризуется двукратным увеличением водоудерживающей способности (НВ=26-28%). Внесение в супесь 0,3% от массы сухой почвы сильнонабухающего полимерного гидрогеля (СПГ) на основе радиационно-сшитого полиакриламида [Смагин, Садовникова, 2009] увеличивает НВ практически втрое, позволяя довести уровень водоудерживания до такового в окультуренной торфяной почве.

Подобные приемы увеличения водоудерживающей и поглотительной способности городских почв и почвенных субстратов, наряду с превентивными мерами по отношению к антропогенному (техногенному) загрязнению корнеобитаемого слоя водорастворимыми формами поллютантов-электролитов были заложены в различные варианты почвенных конструкций на объекте (см. сл. главу). Принципы и примеры их проектирования с оценкой доз почвомодификаторов, мощностей и глубин заложения соответствующих функциональных слоев

(горизонтов) приведены в соответствующих разделах предыдущих глав монографии (4, 5) .

Для проведения тестирования технологии почвенного конструирования на выбранном объекте был заключен договор о сотрудничестве с ИЛРАН, в ведомственном подчинении которого находится Серебряноборское опытное лесничество с данным участком территории. Из-за задержек в финансировании проекта опыт, запланированный на начало лета, пришлось осуществить лишь июле-августе 2010 г. На этот период пришлась длительная засуха в г. Москве с экстремально высокими температурами и отсутствием осадков. Зеленые насаждения города испытывали в этот период крайнее угнетение с отмиранием вегетативных органов и практически полной депрессией фотосинтеза. И основная причина такого состояния, повторяем, – не уровень загрязнения почвы, а недостаток в ней влаги. На этом фоне с помощью приемов почвенного конструирования удалось сформировать активно-функционирующие зеленые газоны, в несколько раз превышающие по фитомассе и качеству контрольные участки.

Возвращаясь к характеристике объекта, отметим, что территория ведомственного участка была огорожена и охраняема, что позволило разместить на ней дорогостоящее оборудование на время эксперимента. Вместе с тем после посадок газон подвергался обычному для городских территорий режиму – нагрузке на поверхность со стороны человека (регулярные посещения площадок экспериментаторами для контроля параметров функционирования почвенных конструкций), а также многочисленных животных в виде стаи крупных дворовых собак, беспрепятственно перемещавшихся по территории и наносящих определенный урон газону в виде экскрементов и спорадической роющей деятельности.

Схема опыта, описание вариантов конструкций, использующихся почвенных материалов, последовательность действий почвенного конструирования, приведены последующей главе. В завершающей части данного раздела обратимся к краткой характеристики спорадических дополнительных объектов (площадок), на которых в мини-вариантах были реализованы работы по конструированию городских почв.

Инициативные исследования группы студентов под руководством к.б.н., доцента М.А. Сидоровой по влиянию грубодисперсных мульчирующих покрытий на почвенные режимы и биологическую активность (дыхание) городских почвенных объектов осуществлялось на лизиметрической площадке Почвенного стационара МГУ. Лизиметры были созданы по проекту зав. каф. физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ проф. Н.А. Качинского в 1960г. Рабочая площадь ячеек с поверхности составляет 9 $м^2$, а глубина 1,75 м. До 150 см отметки они заполнены различными горизонтами дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой из Подольского района Московской области. Ниже располагается 25-см песчано-гравийный слой дренажной засыпки и коллектора лизиметрических вод, доступ к которому осуществляется через специальную подземную шахту.

Под руководством д.б.н., проф. О.А.Макарова группа студнтов и аспирантов производила независимое тестирование технологии почвенного конструирования в полевых условиях на малых формах. Конструкции были сформированы вручную на площадках порядка $1м^2$ на следующих московских объектах:

- Правобережный р-н, обочина Мичуринского проспекта, газон и посадки яблонь вдоль ограды Ботанического сада МГУ;
- Филевская пойма, долинно-зандровый р-н, промышленная зона между Москвой-рекой и Филевским парком, пустырь с порослью клена, кустарников, сорной растительностью;
- Левобережный р-н, Красностуденческий проезд, селитебная зона, деградированная газонная растительность;
- Левобережный р-н, Тимирязевская ул, промышленная зона, деградированная газонная растительность.

На этих объектах тестировался один из наиболее перспективных вариантов предложенных нами технологий с использованием в качестве почвомодификатора сильнонабухающего полимерного гидрогеля. Данная работа проводилась совместно с НИР по проекту «Разработка методик рекультивации, ремедиации и биологической очистки загрязненных и деградированных почв» (ГН №8/3-65п-10) от Департамента науки и промышленной политики города Москвы.

В дополнение к приведенным выше объектам в работе были задействованы материалы предшествующих исследований (2002-2005гг) авторского коллектива, специалисты которого принимали участие в разработке проектов озеленения и комплексного благоустройства нового микрорайона Куркино на северо-западе г.Москвы, расположенного за пределами МКАД. Территория микрорайона относится к Смоленско-Московской возвышенности и занимает преимущественно водораздельное пространство рек Сходни и Химки. Климатические условия района не анализируются отдельно, поскольку ранее была дана общая характеристика таковых для г. Москвы и ближнего Подмосковья. В почвенно-литологическом отношении данный объект близок к рассматриваемому ранее земельному участку УОПЭЦ МГУ «Чашниково» и характеризуется сочетанием преимущественно легких отложений флювиогляциальной равнины с моренными и покровными суглинками и глинами. Первоначально на территории доминировали зональные дерново-подзолистые почвы на суглинистых и легкосуглинистых покровных и моренных отложениях под елово-березовыми и елово-широколиственными лесами [Экологические функции.. 2004]. Активное сельскохозяйственное использование и последующая градостроительная деятельность привела уничтожению лесной растительности на значительной части территории и коренному изменению почвенного покрова. В настоящее время зональные почвы в той или иной мере изменения сохранились лишь на рекреационных объектах («Березовая роща», «Дубовая роща» и т.д.) в границах оставленных лесных массивов Куркино. На большей части территории, подвергшейся застройке, доминируют реплантоземы, чаще всего в самом примитивном варианте – завозной «растительный слой» в виде торфо-песчаной смеси, перекрывающий тяжелые, переуплотненные строительной техникой, отложения в виде морены, покровных суглинков с инородными включениями строительного мусора. За период с 2000 г газоны на таких объектах периодически реконструировались, поскольку быстрая минерализация торфа приводила к сработке «растительного слоя» и вынуждала производить его повторную замену с посадкой семян типичных газонных трав (райграс, мятлик, овсяница и т.д.). На

заброшенных участках развивались рудеральные виды, а иногда – интродуценты, типичные для заболоченных почв, семена и корни которых попадали на территорию вместе с завезенным торфом. Под пионерными видами сорной городской растительности на отвалах строительного грунта и обнаженных после биодеградации газонов поверхностях начинается первичная сукцессия с гумусово-аккумулятивным почвообразованием в виде небольших (1-3см) светлоокрашенных приповерхностных горизонтов А1. Кроме естественных факторов, направленных на образование зональных дерново-подзолистых почв, в этих условиях значительно антропогенное и техногенное влияние в виде поступления мусора, переуплотнения, внесения электролитов (противогололедных средств) с неизбежным подщелачиванием, загрязнение, периодическое механическое нарушение профиля, вплоть до экскавации и замены почвенных слоев. Отсюда сложность и пестрота почвенного покрова даже в относительно молодом микрорайоне 10-летнего возраста весьма значительны.

Резюмируя раздел, отметим, что экспериментальные исследования охватывают широкий спектр почвенно-экологических условий. Объекты стран Аравийского полуострова представляют аридные климатические условия тропического и субтропического пояса, г. Москва и ближнее Подмосковье – гумидный климат с наличием холодного зимнего периода, значительных норм осадков, обеспечивающих промывной или периодически промывной режимы почв. Вместе с тем их роднит ряд сходных факторов (распространение легких почвогрунтов с невысокой водоудерживающей и поглотительной способностью, периодическое совпадение погодных условий – экстремально высокие температуры (до 30-40^{o}С), длительное отсутствие осадков в летний период), а также ряд проблем, преимущественно антропогенного характера (загрязнение (засоление) водорастворимыми формами поллютантов, рекреационная и техногенная нагрузка на поверхность почв и т.д.). В целом объективная тенденция конвергенции антропогенных условий и проблем крупных городов позволяет осуществлять поиск универсальных решений в области технологий почвенного менеджмента, на что и направлена данная конструкторская разработка.

ГЛАВА 7. Описание вариантов исследуемых почвенных конструкций и почвомодификаторов для озеленения и благоустройства территорий с повышенной антропогенной нагрузкой.

7.1. Опыт конструирования в аридных климатических условиях.

Рассмотрим пилотные варианты влагоаккумулятивных почвенных конструкций, разработанные нами для аридных климатических условий на базе научно-обоснованного проектирования с использованием закономерностей и моделей структурно-функциональной организации почв, согласно [Смагин и др., 99, 2008, Смагин, 2006, Смагин, Садовникова, 2009, Smagin et al., 2005]. Основной технологический принцип конструкций – формирование системы отдельных функциональных слоев (горизонтов), имитирующих природную структурно-функциональную организацию почв. Каждый слой выполняет определенные специфичные функции, либо аккумулятивно-биоресурсные, либо защитные (рис. 7.1) При этом используются органические почвомодификаторы на основе природных (торф, компосты, биогумус, гуматы…) и синтетических (СПГ) биополимеров, а также местные грунтовые материалы разной дисперсности. В верхней корнеобитаемой зоне создаются один или два аккумулятивных слоя, запасающих необходимую для растений влагу и питательные элементы. С этой целью применяются либо в чистом виде, либо в композициях с исходным минеральным грунтом природные (торф), модифицированные и синтетические (гидрогели) биополимеры. Нижняя часть отсекается от почвогрунта грубодисперсным экраном, который, прерывая капиллярную сплошность, способствует дополнительному подвешиванию влаги в корнеобитаемой толще и защищает ее от вторичного засоления и загрязнения водорастворимыми поллютантами с восходящими (возвратными) капиллярными токами влаги. Расчет количеств (доз) материалов, а также параметров конструкций (мощностей, глубины залегания слоев) производится на основе фундаментальной теории физического состояния почв с использованием современных компьютерных

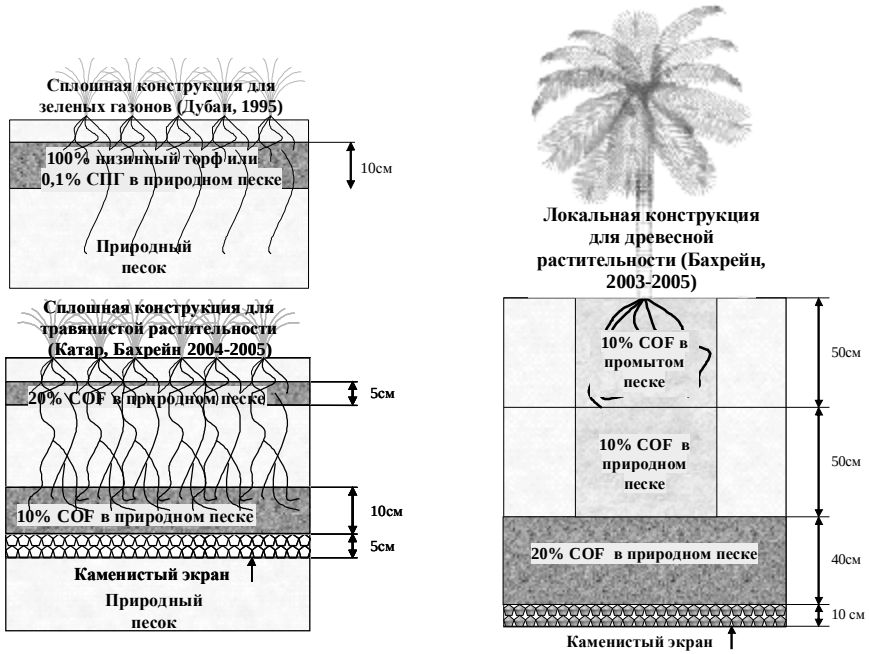


Рис. 7.1. Примеры слоистых почвенных конструкций для газонов и древесной растительности на основе российских технологий «Arid Grow» по [Смагин, 2006, Smagin et al., 2005]. СОГ – твердофазный органогенный почвомодификатор на основе низинного торфа и сапропеля (продукция «Arid Grow»).

моделей энерго-массопереноса и структурно-функциональной организации почв как динамических биокосных систем [Смагин, 2003, 2006, Смагин и др., 2009]. Примеры и принципы подобного проектирования были изложены в предыдущих главах (2, 5).

Принципиально важными в проектах слоистых почвенных конструкций являются вопросы о необходимости смешивания почвенных кондиционеров с вмещающим материалом, а также глубины закладки грубодисперсных экранов, выполняющих функции защиты корнеобитаемого слоя от загрязнения (засоления) водорастворимыми формами поллютантов. Часто бывает выгодным заложить сплошной слой органогенного почвомодификатора на основе торфа, перекрывая его слоем исходного минерального почвогрунта небольшой мощности (2-

3см). Как показано в предыдущих главах, в этом случае органогенный материал дольше сохраняется, а слоистый способ закладки не только резко снижает фильтрационные потери из корнеобитаемого слоя, но и блокирует капиллярное рассасывание, а также подъем влаги с растворенными поллютантами при испарении с поверхности. Поэтому при наличии собственно торфяного ресурса и его невысокой стоимости можно рекомендовать именно такой вариант почвенной конструкции (рис. 7.1, верхняя схема слева).

Если приобретен модифицированный почвенный кондиционер на основе измельченного торфо-сапропелевого сырья (например, продукты серии «AridGrow»), его высокая стоимость и некоторые технологические качества не позволяют применять такой способ заделки. Диспергированный органогенный почвомодификатор может слеживаться (коагулировать) под действием давления вышележащих слоев почвы и (или) иссушения, плохо проводит воду и в условиях практически ежедневных поливов дождеванием с поверхности может приводить к застою влаги, дефициту кислорода в корневой зоне и переувлажнению поверхности с непродуктивным расходом воды на испарение. Поэтому для таких кондиционеров мы рекомендуем производить смешивание с вмещающим минеральным субстратом для достижения концентраций от 10 до 20%, обеспечивающих пескам водоудерживающую и поглотительную способность суглинков. При использовании синтетических кондиционеров в виде СПГ, та же цель достигается значительно меньшими количествами почвомодификатора порядка 0,1-0,2% [Смагин, Садовникова, 2009] (см. также главу 4). Принципиальная схема подобных вариантов сплошных почвенных конструкций под травянистую (газонную) растительность приведена на рис. 7.1 слева внизу.

Для древесной растительности, кустарников, а также ряда сельскохозяйственных культур с индивидуальным (струйным, капельным) орошением экономичнее всего создавать локальные почвенные конструкции с засыпкой почвомодификаторов в корневую зону растений (посадочные ямы, лунки). Их удаление от поверхности способствует сохранению биополимеров от микробной деструкции, а также аккумуляции влаги и растворенных питательных веществ на той глубине, где она

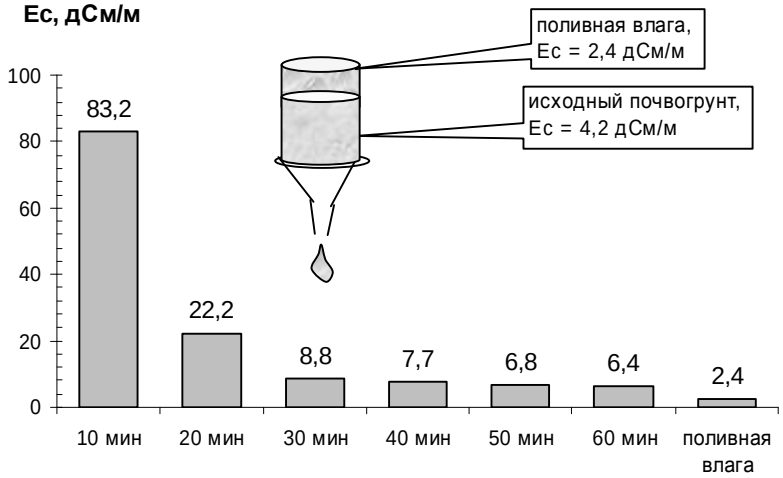


Рис. 7.2. Результат обогащения поливной влаги легкорастворимыми солями при прохождении через слой почвогрунта (кумулятивный эффект).

может активно потребляться конями растений. В случае засоления (загрязнения) исходного почвогрунта водорастворимыми формами электролитов целесообразно использование грубодисперсных экранов, отсекающих корнеобитаемую зону от нижележащей толщи (рис. 7.1, правая часть). Наряду с этим мы рекомендуем проложить до слоя органогенного влагопоглотителя один или несколько вертикальных каналов (скважин), заполненных грубодисперсным материалом (щебень), по которым поливная влага быстро попадает непосредственно в корнеобитаемую зону. Это не только сокращает расход влаги, предотвращая ее испарение с поверхности, но и сохраняет ее качество при локальном массопереносе в коневую зону. В противном случае, двигаясь фронтально через вышележащий слой почвогрунта (засыпки) влага аккумулирует все водорастворимые соли и при попадании в корнеобитаемую толщу она может по солености в несколько раз превышать морскую воду. Это положение подтверждает наш эксперимент с промывкой 20 см слоя типичного почвогрунта Бахрейна (состояние засоления – на

границе слабого (4 дСм/м)) муниципальной ирригационной водой (электропроводность 2,4 дСм/м) (рис. 7.2). На выходе из слоя она настолько сильно обогащается легкорастворимыми поллютантами, что ее электропроводность в первые минуты эксперимента превышает 80 дСм/м, что почти втрое выше, чем в морской воде! Притом, что исходное качество почвогрунта и воды вполне приемлемо по меркам аридных условий. Обращаем внимание на этот ***кумулятивный эффект***, поскольку в условиях г. Москвы древесная растительность продолжает испытывать угнетение от электролитов, несмотря на запреты широкого применения солевых противогололедных препаратов. Промывка ранее аккумулировавшихся в поверхностном слое солей, растворимых форм поллютантов и минеральных удобрений привела к их локализации в корнеобитаемой зоне деревьев и кустарников на глубинах от 50-100 см и более. Разработанные нами варианты локальных почвенных конструкций с грубодисперсными солезащитными экранами и вертикальными каналами позволяют избежать подобных негативных эффектов. Поскольку в Госконтракте ПМ № 8/3-66н-10 не предусматривались анализ и испытания локальных конструкций под древесной растительностью, мы больше не будем касаться этой темы, отсылая заинтересованных специалистов к нашей зарубежной монографии [Smagin et al., 2005], где дано подробное описание подобных конструкций со схемами и технологическими приемами их создания.

Возвращаясь к типу сплошных влагоаккумулятивных почвенных конструкций на основе природных, модифицированных и синтетических биополимеров, отметим, что для объектов с повышенными требованиями к устойчивости и функционированию зеленых насаждений можно рекомендовать не один, а несколько (2 и более) аккумулятивных слоев, с последовательным заглублением от поверхности (рис. 7.1, левая часть внизу). В этом случае приповерхностный слой почвомодификатора служит для укоренения и начального развития растений, а более глубокие выступают в качестве депо влаги и биофильных элементов, в которое корни растений проникают по мере их развития, обеспечивая нарастающую потребность во влаге и питательных элементах. Модели подобных двуслойных систем, приведенные в главе 5,

показывают, что в них сосредотачивается количество доступной влаги, обеспечивающее потребности газона на 20-30 дней засушливого периода без осадков. При этом заглубление органогенных почвомодификаторов гарантирует пролонгацию срока их службы до 10-15 лет и более, вместо 1-3-летнего периода сохранности «растительного слоя» в виде торфопесчаной смеси на поверхности почвы, использующейся в традиционных для мегаполиса технологиях озеленения.

Глубина заделки грубодисперсного экрана, разрывающего капиллярную связь в почвогрунте и предохраняющего корнеобитаемый слой от загрязнения (засоления) водорастворимыми формами вредных веществ может значительно варьировать в зависимости от конкретных условий объекта почвенного конструирования. Так при наличии постоянного орошения, характерного для аридных условий, а также для ряда объектов повышенной значимости в столичном мегаполисе можно подобную прослойку формировать уже на глубинах 10-20 от поверхности почвы. В этом случае вышележащая почвенная толща, обладая гидростатическим давлением не более 10-20 см.вод.ст. (1-2 Дж/кг матричного потенциала влаги) будет аккумулировать практически всю воду в верхнем корнеобитаемом слое в состоянии близком к насыщению (полной водовместимости) [Смагин и др., 2008]. В этом несложно убедиться, анализируя ОГХ почвогрунтов и определяя их равновесную влажность (влагоемкость) при данных величинах потенциала. Такой феномен был назван нами «эффектом антидренажа», и он лег в основу проектов ряда влагоаккумулятивных почвенных конструкций в условиях приморских стран Персидского залива, где обилие каменистых включений (limestone) в нативных почвах дает возможность использовать такую технологию без каких либо дополнительных расходов на почвомодификаторы. Вместе с тем, если орошения нет, или оно спорадически прерывается на несколько дней, подобные экраны будут причиной гибели растений, поскольку проникнуть через них корни в нижележащую толщу могут не успеть, а запас влаги из верхнего 10-20см слоя быстро исчерпается. Таким образом, подобные конструкции, по сути, являются аналогом гидропоники и могут

устойчиво функционировать лишь в периодическом (каждые 2-5 сут) потоке поливной влаги.

В случае типичных для мегаполиса участков без искусственного полива, грубодисперсный защитный экран должен быть заглублен минимум на 40-50см от поверхности почвы по аналогии с нативными почвами укороченного профиля, подстилаемых галечником, которые были рассмотрены в главе 1. Именно для этих вариантов компьютерное моделирование выявило аккумуляцию влаги достаточную для устойчивого роста и развития газонов в течение нескольких недель вероятного периода без атмосферных осадков. Однако, в песчаных почвогрунтах при давлении (потенциале) влаги в 4-5 Дж/кг, соответствующем 40-50см почвенному профилю, основное количество влаги осадков будет стекать в подстилающий грубодисперсный экран, в чем несложно убедиться, определяя по ОГХ равновесную с 4-5 Дж/кг потенциала влажность (влагоемкость). Она составит не более 7-8% по объему при полной влагоемкости порядка 30%, то есть 2/3 влаги, насыщающей почву при обильных осадках или таянии снега, не сможет задержаться такой конструкцией и стечет в грубодисперсный экран. Последний в этом случае будет действительно выполнять функцию дренажа. Поэтому для таких вариантов почвенных конструкций необходимо обязательное размещение в верхней корнеобитаемой толщи почвенных кондиционеров-влагопоглотителей на основе природных или синтетических биополимеров (рис. 7.1, нижняя часть слева).

Перейдем к характеристике конкретных ***вариантов тестирования почвенных конструкций*** в аридных климатических условиях. Первый авторский опыт относится к 1995г [Смагин и др., 99]. Он осуществлен на территории станции озеленения и садоводства муниципалитета Дубаи (О.А.Э). В качестве основных компонентов почвенных конструкций были использованы низинный торф (Яхроминская пойма, Подмосковье) и синтетический полимерный сильнонабухающий гидрогель (СПГ). Анализ их свойств приведен в предшествующих главах монографии. Согласно данным по ОГХ, водоудерживающая способность торфа в 3 раза превышает таковую в исходном песчаном грунте. При этом общая влагоемкость материала может достигать 75% от объема.

Коэффициент фильтрации воды в торфе чрезвычайно высок (6814 см/сут), в связи с чем его водопроницаемость можно отнести к провальной. Однако при закладке торфа в нативный песок в виде сплошного слоя удается в 15-20 раз понизить фильтрацию, доведя значения коэффициентов до 13-15 см/сут на фоне 220-230 см/сут в однородной песчаной почве (см. главу 4).

СПГ представлял собой современный почвенный кондиционер с максимальной степенью набухания до 1000 $см^3$ H_2O на 1 г сухого вещества, получаемый синтетическим путем на основе полиакриламида. Как показали специальные лабораторные исследования [Смагин, Садовникова, 94], оптимальные концентрации гидрогеля в смеси с песчаными субстратами не превышают 0,1-0,2% от массы почвы (см. главу 4). В качестве тестовой растительной культуры выбрана трава Paspalum hybrid, как наиболее подходящий толерантный сорт для выращивания зеленых газонов в черте города, на виллах, спортивных площадках и вдоль автомобильных дорог в условиях О.А.Э.

Для демонстрации эффекта предложенных конструкций проводился полевой эксперимент, организованный по следующей схеме. Территория опытного поля была поделена на три равных участка общей площадью 720 $м^2$. Участок «А» возделывали по технологии Департамента садоводства и паркового хозяйства Муниципалитета г. Дубаи, согласно которой на поверхность песчаной почвы вносились древесная стружка и гранулированный органический материал, представляющий собой переработанные бытовые отходы (аналог доминирующей технологии озеленения в Москве с использованием торфяной крошки на поверхности). На втором участке испытывалась новая технология в двух вариантах – с гидрогелем и торфом. Территория состояла из рабочих площадей («В», «С») по 80 $м^2$ каждая. На территории «В» в верхнем горизонте почвы создавался слой с 0,1% концентрацией гидрогеля. На следующей площади «С» использовался слой торфа, перекрытый сверху исходным песчаным грунтом. В качестве контроля выступал участок «Е», где никакой обработки почвы кроме ирригации не проводилось.

Вся территория была равномерно засажена кустами газонной травы. Плотность посадки составила 15-16 экз/м^2. По окончании эксперимента проводилась оценка биомассы растений и содержания хлорофилла в качестве показателей их состояния. Участки орошались дождеванием с помощью стационарной ирригационной системы с автоматическим и ручным управлением, что позволяло задавать любые нормы и сроки поливов. Ирригационные насадки радиусом действия 5-6 м при давлении воды в системе 5 атм. располагались равномерно на территории поля на расстоянии 4м друг от друга. В ходе эксперимента ежедневно контролировались влажность почвы с отбором проб буровым методом, запасы влаги, матричное давление с помощью ртутных тензиометров, электропроводность почвенных паст, динамика испарения методом взвешивания малых лизиметров, учитывался расход поливной воды и равномерность ее поступления на поверхность газонов.

Более поздние исследования 2005-2008 гг, проведенные на объектах муниципального и сельского хозяйства в королевствах Бахрейн, Иордания и эмирате Катар принципиально не отличались по схеме проведения от описанного выше эксперимента. Здесь основным почвомодификатором был российский продукт системы «AridGrow» на основе измельченного и обогащенного биофильными элементами торфо-сапропелевого сырья (см. главу 2). В связи с этим все конструкции, за исключением локальных в Иордании, содержали влагоаккумулятивный плодородный слой на основе смеси почвомодификатора с нативным почвогрунтом. В Бахрейне (2005г) сплошные конструкции тестировались на станции Министерства сельского и муниципального хозяйства в столице государства г. Манаме. Исследования выполнялись целиком специалистами станции под руководством научного сотрудника Ахмеда Сафи. Основной травянистой культурой в эксперименте была выбрана люцерна. Внешний вид экспериментальных площадок приведен фото 11 (см. Приложение). В связи со спецификой культуры использовался способ поверхностной ирригации (flood irrigation) со сплошной заливкой оросительной влагой опытных делянок. Концентрации почвомодификатора AG варьировали от 5 до 10%. Технология

сравнивалась с органическим земледелием, при котором в почву в качестве удобрения регулярно вносился куриный помет. Контролем служила фоновая окультуренная почва станции в виде так называемого сельскохозяйственного песка, просеянного от каменистых включений. В процессе эксперимента сотрудниками станции контролировалась продуктивность тест-культуры и затраты поливной влаги отдельно по двум вегетационным сезонам (зимний, летний).

Помимо этих экспериментов в королевстве Бахрейн были осуществлены крупномасштабные опыты по посадке древесной растительности на закрытой территории загородной королевской резиденции Сахир, озеленения и комплексного благоустройства дворцового комплекса Рауди-палас, а также ряда частных объектов в виде вилл и придомовых территорий, производимые по индивидуальным заказам. Результаты повсеместно подтверждали преимущественно системы AridGrow перед традиционными технологиями озеленения. Они вошли в ряд авторских публикаций, включая зарубежную монографию-руководство [Smagin et al., 2005]. В данной работе эти результаты не приводятся, поскольку значительная часть опытов касалась древесной растительности, и многие эксперименты не сопровождались постоянным мониторингом экологического состояния в силу ограниченного доступа на объекты.

Тестирование почвенных конструкций с грубодисперсными антисолевыми экранами было произведено летом 2005 г на загородной станции Министерства сельского и муниципального хозяйств Катара – Аль Джазия, расположенной в 60 км от столицы эмирата г. Доха. На предварительно спланированном участке станции с доступом к оросительной системе была произведена экскавация 30см слоя почвогрунта с помощью дорожного бульдозера-скрепера. На дно образованного ложа был помещен 5см слой строительного щебня (диаметр до 5см) и после его увлажнения во избежание осыпания сухой песчаной массы, сверху был возвращен исходный почвогрунт (фото. 12, Приложение). В нем была создана 10% концентрация почвомодификатора AG. После чего территория равномерно засаживалась кустами тестовой газонной травы Паспалум (Paspalum vaginatum) с плотностью

порядка 15 экз/м^2. В качестве контроля выступала аналогичная площадка без почвомодификатора. Исследования проводились совместными усилиями российских и арабских специалистов, со стороны МГУ им М.В. Ломоносова за организацию и проведение опытов отвечал научный сотрудник ИЭП МГУ, к.б.н. Р.Р. Кинжаев.

Заключительный пример раздела касается недавнего комплексного полевого опыта, законченного в декабре 2008г на плантациях картофеля в Иордании. Там по нашим рекомендациям при посадке картофеля в лунки засыпался торфяной почвомодификатор «Arid Grow» в разных количествах, после чего слой перекрывался природным песком. Таким образом, создавалась локальная слоистая конструкция, препятствующая растеканию влаги при точечном струйно-капельном орошении под куст растения (drip irrigation). Эксперимент проводился полностью специалистами кампании AICAD по классической схеме полевого опыта с выравниванием прочих условий в вариантах с разными дозами почвомодификатора от 100 до 300 см^3/куст и четырьмя нормами полива -125 150, 170, 200 мм. Контролем служили делянки, возделываемые по традиционной технологии с внесением минеральных удобрений и нормой полива 400мм. Картофель выращивался на грядках размером 2х6м, отделенных друг от друга 2м междурядиями и 1м промежутками в торцах грядок. При расчете урожайности в ц/га учитывался средний урожай на грядке отнесенный к общей площади с учетом междурядий.

7.2. Почвенные конструкции на объектах г. Москвы и ближнего Подмосковья

Основной опыт по тестированию почвенных конструкций в условиях столичного мегаполиса производился на закрытой территории Серебряноборского лесничества в ЗАО (р-н Крылатское). Схема опыта представлена на рисунке 7.2. Экспериментальный участок 10х20 м был поделен на две одинаковые площадки в виде квадратов с ребром в 10м. На одной из площадок почвогрунт был снят до глубины 50 см с использованием трактора-универсал JCB с квалифицированным оператором (фото. 10 Приложения). На дно образовавшегося

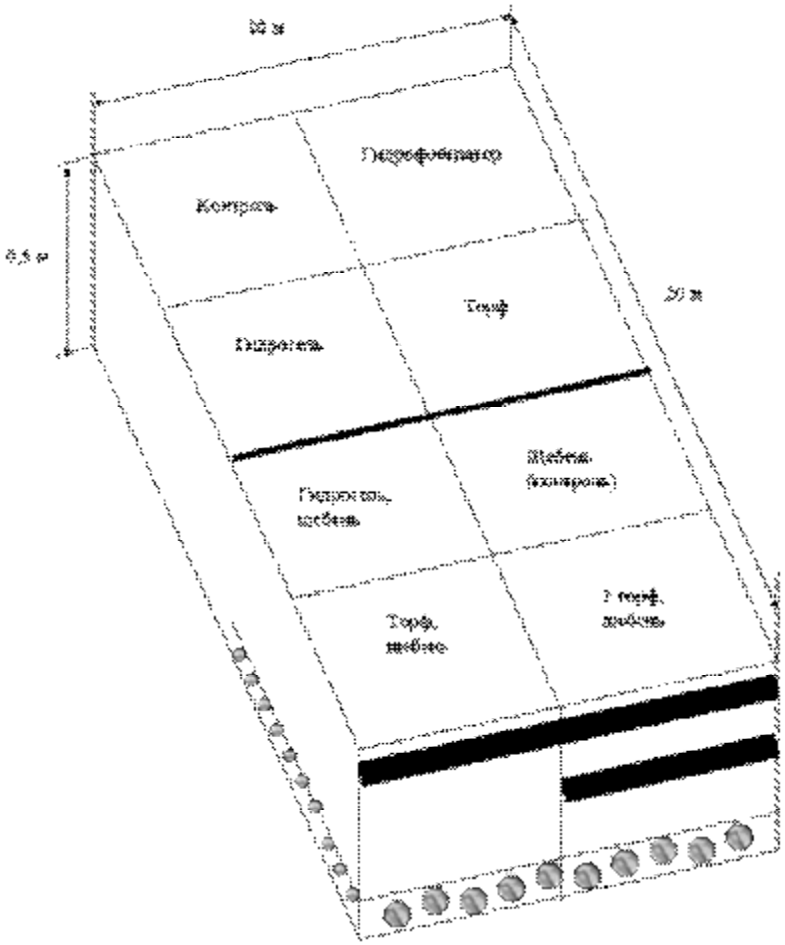


Рис. 7.3. Схема опыта по конструированию почв в Крылатском (Серебряноборское л-во), 2010г.

ложа был помещен щебень (максимальный размер отдельностей до 5см) слоем в 10см. Общий расход материала на 100м^2 составил, соответственно 10 м^3. На другой площадке подложка из щебня отсутствовала. Каждая из площадок (с щебнистым экраном и без) делилась на 4 одинаковых квадратов-ячеек размером 5х5м. В этих ячейках формировались различные

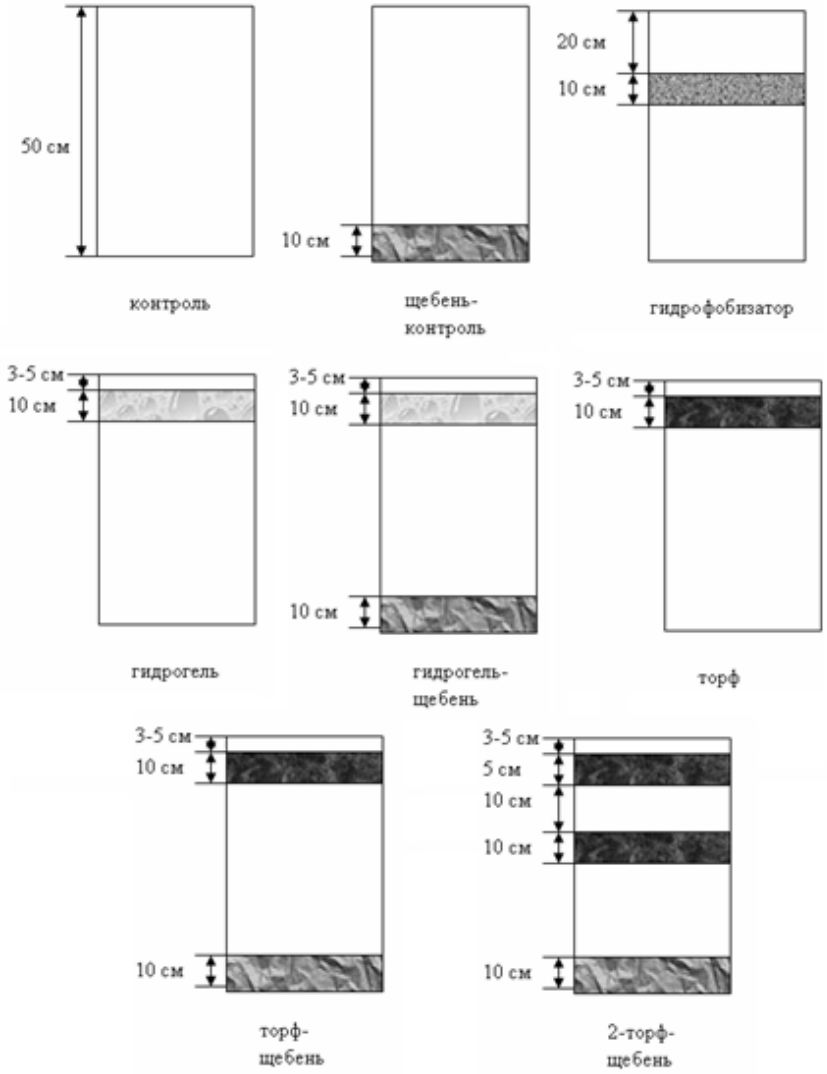


Рис. 7.4. Схемы почвенных конструкций эксперимента по тестированию на основном объекте в Крылатском (Серебряноборское л-во), 2010г

варианты почвенных конструкций для озеленения и благоустройства территорий мегаполиса. Всего испытывалось 7 вариантов конструкций + контроль (рис. 7.3, 7.4). Основные запланированные варианты, проектирование которых с помощью моделей энерго-массобмена в почвах осуществлялось в предыдущих главах, были следующими:

- конструкция с исходным песчано-супесчаным почвогрунтом с подстиланием на глубине 40см щебнистым экраном;
- конструкция с 10 слоем низинного торфа, перекрытого сверху 5см слоем исходного супесчаного почвогрунта;
- аналогичная конструкция с 10 см слоем торфа, подстилаемая с глубины 40 см 10 см слоем щебня;
- конструкция с двумя слоями торфа (верхний – 5см, нижний – 10см) в исходном супесчаном почвогрунте, подстилаемая на глубине 40 см 10 см слоем щебня;
- конструкция с 10см слоем сильнонабухающего полимерного гидрогеля (0,2%) в исходном супесчаном почвогрунте;
- аналогичная конструкция со слоем гидрогеля, подстилаемая на глубине 40 см 10 см слоем щебня;

Дополнительно был реализован еще один вариант почвенной конструкции, не запланированный в ТЗ Госконтракта, а именно – слой нативного супесчаного почвогрунта, в который на глубине 20 см от поверхности был внесен водорастворимый гидрофобизатор. Подобная технология может быть альтернативой грубодисперсных экранов для блокирования капиллярных эффектов, повышения влагоемкости и защиты корнеобитаемого слоя от загрязнения (засоления). В качестве гидрофобизатора был применен раствор метилсиликоната калия (торговая марка СОФЭКСИЛ®-40 (ТУ 2229-008-42942526-00 с изм.1-2)); разработка и реализация ЗАО НПО «СОФЭКС» (www.sofex.ru). Препарат широко используется в самых различных областях, связанных со строительством и материаловедением: при защите от влаги стройматериалов и конструкций, изделий из гипса, керамики, известняка, бетона, кирпича и т.д., в производстве бетона, цемента, тротуарной плитки, бордюрного камня, для горизонтальной гидроотсечки в фундаментах методом

пошагового бурения и инжекции. Срок службы металлорганического гидрофобного покрытия не менее 5 лет.

Поскольку предварительных экспериментов для определения дозы препарата проведено не было, в нашей технологии гидрофобизации подпочвенного слоя учитывалась рекомендация производителей при обработке цемента не применять гидрофобизатор в концентрациях больше чем 0,2% от массы вмещающего материала. В пересчете на 10 см слой вмещающего нативного песка плотностью 1,3 г/см^3 эта доза составила 260 г/м^2 или около 6 л концентрата на рабочую площадку (ячейку) конструкции. Заданный объем концентрата был разбавлен водой ≈ в 30 раз в 200 л пластиковой бочке (рис. 2.6), а затем полученный раствор был равномерно внесен на поверхность песчаного почвогрунта рабочей ячейки посредством полива. После впитывания и подсыхания почвы на воздухе на поверхность был возвращен верхний гумусовый супесчаный слой. Отметим, что с технологической точки зрения более эффективным и экономичным будет способ инжекции для внедрения растворов гидрофобизатора в подпочвенный слой, но для этого требуется специальное компрессорное оборудование. Возможен и еще один нетрудоемкий способ внесения препарата – с подачей водного раствора на поверхность и последующим вытеснением до заданной глубины чистой водой.

Возвращаясь к характеристике основных вариантов почвенных конструкций, рассмотрим специфику реализации каждого из них с использованием техники и, частично, ручного труда на экспериментальных площадках (фото 10, см Приложение). Варианты с органогенными слоями на базе подмосковного низинного торфа создавались следующим образом. Универсальный JCB-трактор с помощью ковша подвозил торф на подготовленные им же площадки и производил предварительное распределение материала по поверхности. Окончательное выравнивание торфяного слоя на заданную мощность (5 или 10 см в зависимости от варианта конструкции) производили двое чернорабочих граблями. После этого трактор нагребал ковшом слой покрывающего торф исходного почвогрунта и разравнивал площадку передним скребком. Расход торфа для слоя 10см на двух рабочих

площадках (ячейках) по 25 $м^2$ каждая составил, соответственно, 5$м^3$, а для двухслойной конструкции (5 и 10см) – 3,8$м^3$.

Во альтернативной серии конструкций вместо торфа был использован синтетический почвомодификатор в виде сильнонабухающего полимерного гидрогеля ВУМ-ИТХ (совместная разработка Уральского химического завода, и ИТХ УОРАН г.Пермь). Гидрогель представляет собой сополимер акриламида и акрилата аммония, наполненный (28%) твердыми отходами биокаталитического производства акриламида. Наполнитель представляет собой смесь клеток микроорганизмов, клеточных агломератов и вспомогательного фильтрующего материала (фильтроперлит). Сшивающий агент – метиленбисакриламид. Готовый гидрогель имеет размер гранул от 1 до 5 мм. Водопоглощение – 350 г/г в подсушенном состоянии и до 580-640 г/г в свежем.

Варианты конструкций с гидрогелем подготавливались следующим образом. Расчетное количество СПГ составило порядка 260-300 г/$м^2$ (0,2% в слое 10 см при плотности 1,3-1,5 г/$см^3$) или ≈6-7 кг на рабочую площадку (ячейку). Сухой гель высыпался из полиэтиленовой упаковки в пластиковые бочки (по 7 кг на каждую) и заливался водопроводной водой приблизительно до половины объема (не более 100 л) с периодическим ручным перемешиванием (фото 10, илл. справа во втором верхнем ряду). После этого бочки в закрытом состоянии оставлялись до следующего дня (10-12 часов) для реализации свободного набухания гидрогеля. По прошествии этого времени препарат, вбирая всю жидкую воду, превращался в 2-3 см кусочки студня. Бочка транспортировалась к рабочим площадкам, и ее содержимое распределялось равномерным слоем на поверхности подготовленных ячеек. Вручную (лопатами) гель перемешивался с вмещающим материалом на глубину 10 см. (При наличии мотокультиватора типа «Крот» эту операцию можно производить более быстро механизированным способом). После этого поверх слоя с гидрогелем возвращался исходный гумусовый горизонт 5см мощности. Отметим, что для газонов, на которые не предусматривается нагрузка на поверхность в течение 1-2 месяцев после подготовки, можно вообще не смешивать гель с почвой, а сразу перекрывать его (засыпать) минеральным почвогрунтом. Для растений это даже

более эффективный вариант, особенно при дефиците влаги в жаркое летнее время, поскольку корни проростков сразу устремляются в слой гидрогеля и обволакивают его частички, предавая тем самым механическую устойчивость конструкции. Однако любая нагрузка на поверхность такой конструкции до закрепления геля корнями растений (дерниной) будет приводить к его выдавливанию поверх минерального слоя, что ухудшает эстетическое восприятие и технологические функции газона.

Земельные работы по подготовке почвенных конструкций на участке в две сотки были осуществлены 10.07.2010 всего за одну трудовую смену (7 часов) квалифицированного оператора трактора-универсала JCB при помощи двух чернорабочих. После реализации всех видов почвенных конструкций участок был обильно полит водой из пожарного гидранта со специальной насадкой-распылителем для осуществления влагозарядки аккумулятивных слоев (фото 10). Расход влаги измерялся временем полива при определенной заранее скорости потока. Влагозарядковый полив при скорости струи ≈100л/мин осуществлялся с 11 по 13.07.2010 в 12 приемов по 20 мин каждый. В результате на весь участок 20х10 $м^2$ было подано 24 $м^3$ воды или по 120 л на каждый квадратный метр конструкции.

После насыщения почвы влагой 13.07.2010 был осуществлен посев газонных трав с разбрасыванием семян вручную и заделкой граблями на глубину 1-2см. Использовалась травосмесь «универсальный газон» (райграс пастбищный, овсяница красная, мятлик луговой) нормой высева порядка 50г/$м^2$. Для посева 10 кг мешок семян был разделен на 8 равных частей по 1,25 кг каждая из расчета рекомендованной нормы высева на индивидуальную почвенную конструкцию размерами 5х5$м^2$. По завершении посева поверхность почвы была закрыта лутрасилом (тонкий геотекстиль) во избежание склевывания семян птицами (фото 10, внизу).

Параллельно с подготовкой почвенных конструкций на участке было установлено необходимое оборудование для экологического мониторинга и контроля состояния и функционирования исследуемого объекта (см. главу 3). Во время эксперимента на участке непрерывно контролировались метеопараметры, определялись показатели динамики содержания и запасов почвенной влаги, электропроводности

(относительной концентрации искусственных загрязнителей), почвенного дыхания (эмиссии диоксида углерода), осуществлялась визуальная оценка и морфометрия показателей роста травянистой растительности (размеров вегетативных органов и фитомассы).

На большинстве дополнительных городских объектов (Мичуринский пр-т, Филевская пойма, Красностуденческий проезд, Тимирязевская ул.) на малых площадках размером 1м^2 был реализован «экономный» вариант почвенной конструкции с гидрогелем ВУМ-ИТХ. Фотография проведения эксперимента молодыми специалистами ф-та почвоведения МГУ и АНО «Экотерра» на участке обочины Мичуринского пр-та 09.07.2010 (дата закладки конструкции) приведена в Приложении (фото 13). Использовалась несколько меньшая доза сухого гидрогеля в 200 г/м^2. Указанное количество сухого СПГ засыпалось в 5л пластиковые бутыли, заливалось 2 литрами водопроводной воды и оставлялось на 4-6 часов для реализации свободного набухания. По прошествии этого времени студнеобразные набухшие частички СПГ вытряхивались из горлышка бутыли на поверхность площадки, с которой предварительно сгребали верхний 5см слой почвогрунта. Далее почвогрунт возвращался на прежнее место, изолируя слой набухшего гидрогеля от поверхности. На поверхность вносились семена газонной травосмеси в количестве 20 г/м^2 с заделкой граблями на глубину 1-2см. После чего почва поливалась водой из лейки нормой 5л/м^2. На делянках контролировался водно-воздушный режим методом диэлькометрии и взвешивания малых лизиметрических стаканчиков, температура, дыхание (эмиссия CO_2), испарение, а также интенсивность поглощения окиси углерода (угарного газа) поверхностью почвы (см сл. главу). По прошествии месяца брались укосы на определение фитомассы травостоя.

На лизиметрической площадке почвенного стационара МГУ, а также ряде спорадических московских объектов (Крылатское, Куркино) производились наблюдения за вариантом почвенных конструкций с грубодисперсным покрытием в виде щебня различного генезиса (строительные отходы, гранитная, мраморная крошка). Такие конструкции, лишенные сплошного растительного покрова, перспективны вдоль автомагистралей, в промышленных и отчасти

рекреационных зонах, где почвы испытывают интенсивную поверхностную нагрузку. Они продолжают выполнять главные ремедиационные функции по отношению к окружающей среде – очищение городской атмосферы, перевод поверхностного стока во внутрипочвенный с очищением загрязненных поверхностных вод при инфильтрации и пополнением запаса почвенно-грунтовых вод, предохранение земной поверхности от водной и ветровой эрозии (пыления) и т.д. Спорадически на такой территории можно высаживать устойчивые к техногенному засолению (загрязнению) и выхлопным газам породы древесно-кустарниковой растительности (солитеры), а также разбивать цветники. В связи со спецификой функционирования подобных конструкций в программу исследований входили замеры показателей водного режима, дыхания (эмиссии CO_2) и поглощения окиси углерода.

Отдельный дополнительный вариант с лизиметрическими наблюдениями включал сравнение гомогенной дерново-(урбо)подзолистой почвы со слоистой влагоаккумулятивной конструкцией с щебнистым экраном из керамзита и прослойкой влагопоглотителя из органогенного торфосапропелевого почвомодификатора AG. В отличие от аналогичных конструкций на основном объекте в ЗАО (Крылатское, Серебряный бор) этот вариант характеризовался более тяжелым среднесуглинистым гранулометрическим составом почвы лизиметра. Поскольку водоудерживающая и поглотительная способность у такой почвы была существенно выше, чем у рассмотренных выше песчано-супесчаных аналогов (полевая влагоемкость НВ≈22-25%), здесь не было особой необходимости в ее оптимизации и на передний план выступала задача защиты корнеобитаемой толщи от водорастворимых форм поллютантов посредством ее гидроотсечения керамзитовым экраном. В эксперименте на поверхность конструкции был внесен раствор хлористого натра (6 г/л) с добавлением уксуснокислого свинца (250 мг/л), обеспечивающий промачивание верхней 40см толщи и ее равномерное загрязнение (засоление) до уровня выше ПДК. После прекращения гравитационного оттока была осуществлена промывка конструкции водопроводной водой (заливочный слой 10 см) и в дальнейшем она была изолирована от поступления

какой либо влаги для возможности капиллярного подъема солей поллютантов из нижележащих слоев в корнеобитаемую толщу при испарении влаги с поверхности. В эксперименте контролировались характеристики температурного, водно-воздушного режимов, а также динамики электропроводности (относительной концентрации загрязняющих веществ). Во избежание загрязнения лизиметрической площадки опыт проводился с использованием технологии съемных монолитов (см. главу 3). Аналогичные опыты с искусственным загрязнением почвенных конструкций раствором хлорида натрия были проведены и на основном объекте в Крылатском.

В заключение раздела охарактеризуем еще один эксперимент, проведенный до начала реализации основного проекта по мегаполису (Госконтракт ПМ № 8/3-66н-10 в качестве инициативных исследований авторского коллектива на подмосковной территории УОПЭЦ МГУ «Чашниково» [Смагин и др., 2008]. Схемы вариантов почвенных конструкций приведены на рисунке 7.5. В качестве почвенных материалов использовался низинный торф поймы р. Клязьма, заготовленный на территории УОПЭЦ «Чашниково» для производства торфонавозных компостов и грубодисперсный щебнистый материал разного генезиса со средним диаметром каменистых отдельностей 1-3 см. Конструктоземы формировались вручную на флювиогляциальных песчаных отложениях после снятия верхнего 30 см пахотного слоя исследуемой легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы. Материалы легкосуглинистого пахотного горизонта и подстилающих песчаных отложений были применены для переслаивания инородных почвенных компонентов (торфа, щебня) в процессе подготовки конструкций.

В полевых экспериментах изучалось поведение влаги в следующих пяти вариантах конструкций: 1) пахотный горизонт (А пах)/торф/песок; 2) А пах/торф/песок/торф/песок; 3) 4)Апах/торф/песок/щебень/ песок и 5) А пах/щебень/песок (см. рис. 7.5). На поверхность конструктоземов устанавливались стандартные металлические рамы, после чего были проведены 6-часовые заливочные эксперименты для определения водопроницаемости и остаточной после гравитационного оттока воды влагоемкости почвы (НВ), согласно руководству

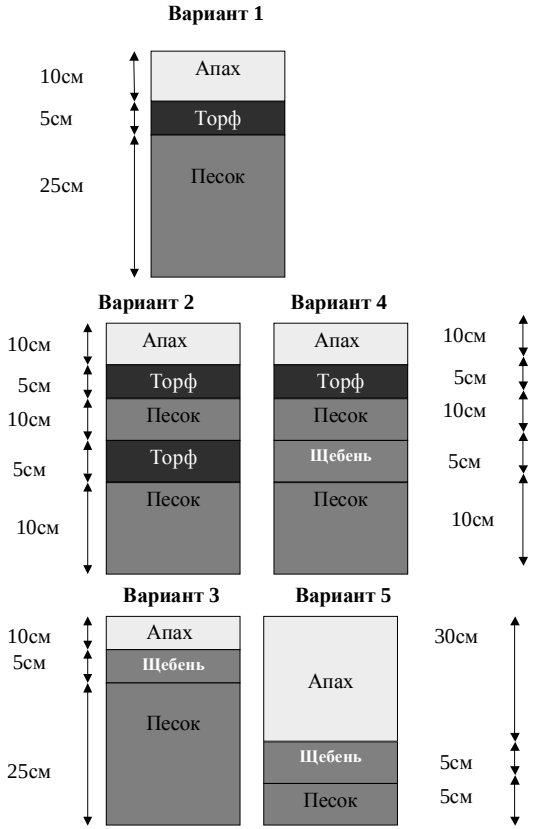


Рис. 7.5. Эксперимент с влагоаккумулятивными почвенными констукциями на основе торфа и щебня в Подмосковье (УОПЭЦ МГУ «Чашниково»)

[Вадюнина, Корчагина, 73]. Контролем в эксперименте служила легкосуглинистая ненарушенная почва на том же участке, подстилаемая флювиогляциальными отложениями, где проводился аналогичный эксперимент. Для определения влажности в почве и конструктоземах наряду со стандартным термовесовым методом и буровым отбором образцов [Вадюнина, Корчагина, 73] был применен индукционный датчик влажности древесины Sh-0453 (Россия) с предварительной калибровкой показаний на почвенных монолитах [Смагин и др., 2006]. Наряду с водоудерживанием и фильтрационными

свойствами слоистых почвенных конструкций, исследовались закономерности их теплового режима с использованием программируемых микро-датчиков DS1921. Естественная растительность при производстве конструкций и на контрольной площадке удалялась, а сажать взамен газонные травы не имело смысла из-за малой продолжительности экспериментов (в пределах декады). Основная цель таких краткосрочных опытов заключалась в исследовании и обосновании «эффекта антидренажа» – возможности подвешивания влаги в верхней корнеобитаемой зоне при отсечении ее грубодисперсным экраном, а также в сравнении эффективности этого технологического способа с вариантами почвенных конструкций на основе влагоемких органогенных почвомодификаторов.

ГЛАВА 8. Результаты полевых экспериментов по тестированию слоистых почвенных конструкций для озеленения и благоустройства территорий с повышенной антропогенной нагрузкой

8.1. Предварительные зарубежные эксперименты в условиях орошения и вторичного засоления аридных земель

Создание оптимальных технологий регулирования водного и солевого режимов почв – актуальное научно-техническое направление, позволяющее решить проблему производства сельскохозяйственной продукции и озеленения городских территорий в жестких климатических условиях при повышенной антропогенной и техногенной нагрузках. Это направление состоит из двух основных частей:

1. Разработка специальных почвенных конструкций с целью концентрации влаги и питательных веществ в корнеобитаемой толще почвы при максимально возможном сокращении ее неэффективных потерь на испарение и отток в глубинные слои.

2. Выбор оптимальных режимов эксплуатации – норм, сроков и способов полива, позволяющих реализовать свойства созданных конструкций в зависимости от требований конкретных растительных культур.

В обстановке повышенной опасности техногенного загрязнения и вторичного засоления, типичной для городских и орошаемых сельскохозяйственных территорий, необходимо, чтобы проектируемые почвенные конструкции и режимы орошения были эффективны не только в отношении возделывания растений, но и служили надежной защитой от деградации природных земельных ресурсов. Чрезвычайно важно учитывать потенциальную угрозу процесса засоления почв как последствие интенсивного орошения, поскольку в противном случае основное национальное богатство страны – ее земельный фонд может быть разрушен в кратчайшие сроки. Процессы аридизации имеют в настоящее время повсеместное распространение и в основном вызваны не рациональным природопользованием со стороны человека, хозяйственной

деятельностью, не учитывающей природные факторы потенциальной деградации почвенного покрова.

Творческий коллектив ф-та почвоведения МГУ при содействии независимых коммерческих организаций России и развитых стран Персидского залива еще в 1995 г. приступил в к комплексным исследованиям в области почвенно-гидротехнических конструкций орошаемых аридных территорий. Результатом этих исследований явилась разработка новой технологии, позволяющей осуществить максимально возможную экономию поливных вод и эффективно бороться с засолением почвы в процессе ее хозяйственного использования. В основе научных исследований лежит теория физического состояния почвы и его динамики [Воронин, 90, Смагин, 2003], см. главу 2). Сущность технологии состоит в создании специальных слоистых почвенных конструкций на базе природных и синтетических материалов, способствующих аккумуляции влаги в корнеобитаемой зоне и резкому сокращению ее потерь в виде внутрипочвенного стока. Условием эффективного функционирования конструкций является правильно организованная ирригация, осуществляемая по дефициту влаги в корнеобитаемой толще. Расчет норм и сроков полива базируется на данных об эвапотранспирации выращиваемой культуры. Таким образом, полностью удовлетворяются потребности растения во влаге при минимальной вероятности ее проникновения в солесодержащие горизонты и минерализованные грунтовые воды. Кроме того, почвенная конструкция оказывает сопротивление вертикальному движению воды не только в нисходящем, но и в восходящем направлениях, снижая интенсивность и высоту ее капиллярного поднятия из нижних засоленных слоев. Все вместе служит средством надежной защиты орошаемых территорий от процесса вторичного засоления.

Рассмотрим один из возможных вариантов технологии, в котором при создании почвенных конструкций использовались отечественные органические материалы природный торф и синтетический полимерный сильнонабухающий гидрогель (СПГ). В качестве тестовой растительной культуры выбрана трава Паспалум (Paspalum vaginatum), как наиболее распространенный вид для выращивания зеленых газонов в

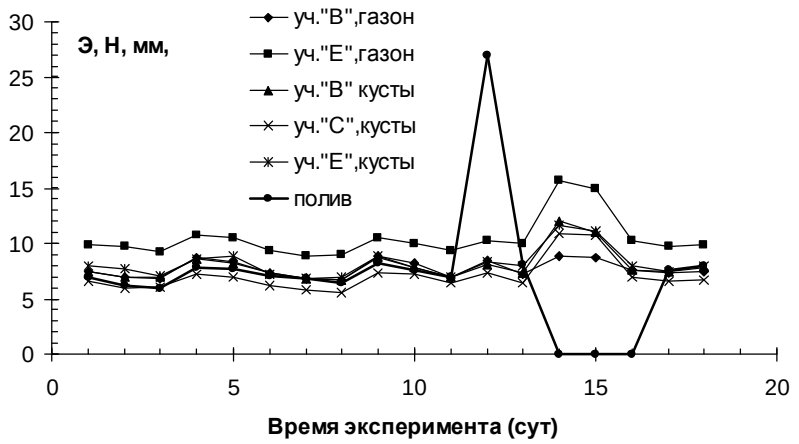


Рис. 8.1. Эвапотранспирация (Э) и режим орошения (Н) опытных участков

черте города, на виллах, спортивных площадках и вдоль автомобильных дорог в условиях О.А.Э. Полевой эксперимент по тестированию технологии был осуществлен на территории опытного поля озеленительной станции департамента муниципального и сельского хозяйства мэрии г. Дубаи, выступающего в качестве независимого эксперта.

Основная идея эксперимента заключалась в создании оптимального режима увлажнения почвенных конструкций, который позволил бы полностью удовлетворить потребности выращиваемой культуры в воде при ее минимальном оттоке за пределы корнеобитаемой зоны.

Для обоснования норм полива с учетом требований растений использовались данные о суточной эвапотранспирации. На рисунке 8.1. представлена динамика эвапотранспирации отдельных экземпляров (кустов) растений и сплошного газона. Средние значения этого показателя составили 7,3 л/м^2 при варьировании от 5,7 до 10,9 л/м^2 в сутки. В соответствии с этим поддерживался режим орошения (рис. 8.1). Средняя поливная норма за период эксперимента составила 7,4 л/м^2.

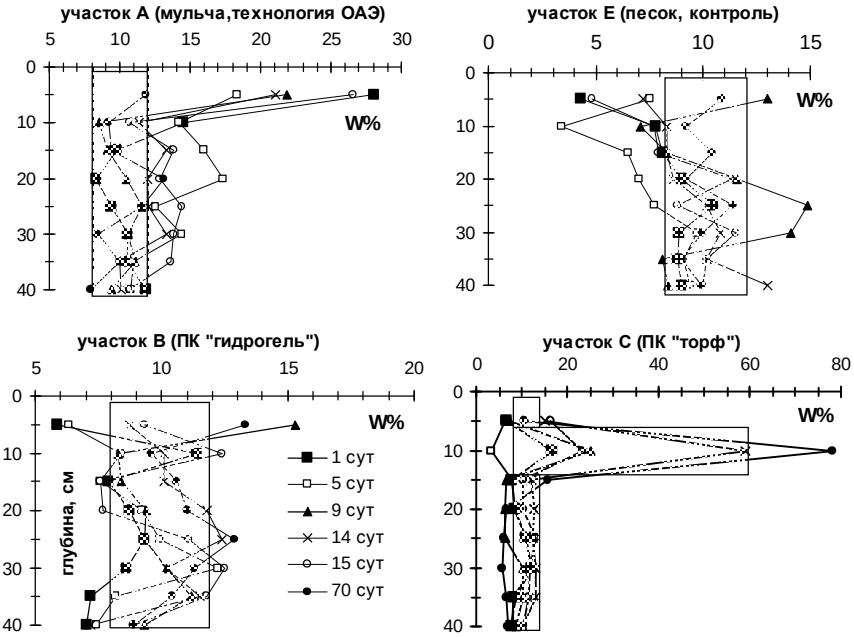


Рис. 8.2. Динамика влажности почв и почвенных конструкций (июнь-сентябрь1995г.). Затененные области – оптимальное влагосодержание.

На рисунке 8.2 выделена область оптимального содержания влаги для исследуемых почв и почвенных конструкций в пределах которой влага остается доступной растениям и вместе с тем достаточно хорошо удерживается почвой, что позволяет минимизировать непродуктивные потери с внутрипочвенным стоком. Определение границ оптимального влагосодержания проводилось по ОГХ, согласно теории физического состояния почв [Смагин, 2003] (см. главу 2). В процессе эксперимента необходимо было поддерживать влажность почвы в указанном диапазоне, чтобы добиться максимальной экономии воды при высокой продуктивности растений. Анализируя динамику влажности почвы экспериментальных участков, убедимся, что на созданных почвенных конструкциях (площадки «B», «C», «D») полностью

удалось добиться поставленной задачи. Из данных (рис. 8.2) следует, что влага аккумулировалась в верхней корнеобитаемой толще, в то время как в нижних горизонтах устойчиво поддерживалась влажность, соответствующая минимальному стоку.

Предложенная арабскими коллегами технология (участок «А») нуждается в совершенствовании, поскольку на их территории наблюдались значительные потери воды. Содержание влаги в почве на глубинах от 0 до 40 см здесь постоянно превышало границу в 10-12%, отделяющую область интенсивного гравитационного стока. Балансовый расчет количества воды, стекающего за пределы верхней 30 см толщи, дал оценку этой величины в 4-7 л/м^2 в сутки, что составляет до 50% принятой в городе нормы полива.

Поскольку на контрольном участке «Е» полив был организован также как и на экспериментальных («В», «С», «D»), влажности нижних горизонтов почвы этой территории находились, как правило, в допустимой (оптимальной) области, что демонстрировало преимущество предложенной технологии даже на необработанных грунтах. Однако, из-за интенсивного испарения и транспирации с поверхности почвы в этом случае, в отличие от экспериментальных почвенных конструкций, верхние горизонты не могли аккумулировать достаточное для продуктивного развития растений количество воды. Впоследствии это подтвердилось оценкой их биомассы.

Изучение динамики давления почвенной влаги в корнеобитаемой зоне с помощью тензиометрии (осуществлялось н.с. кафедры физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ к.б.н. А.К. Губером) подтвердило выводы о доступности воды растениям: ($5<|P|<15$ кПа). Кроме того, выявленные в процессе наблюдений низкие градиенты давления по глубине исследуемой почвенной толщи свидетельствовали о минимальном капиллярном оттоке влаги в нижележащие горизонты. Использование тензиометров позволило оперативно контролировать состояние почвенной влаги до и после полива, что было неосуществимо обычным термостатно-весовым методом определения влажности из-за его длительности. Эти данные, наряду с анализом эвапотранспирации учитывались при разработке режима полива опытных участков.

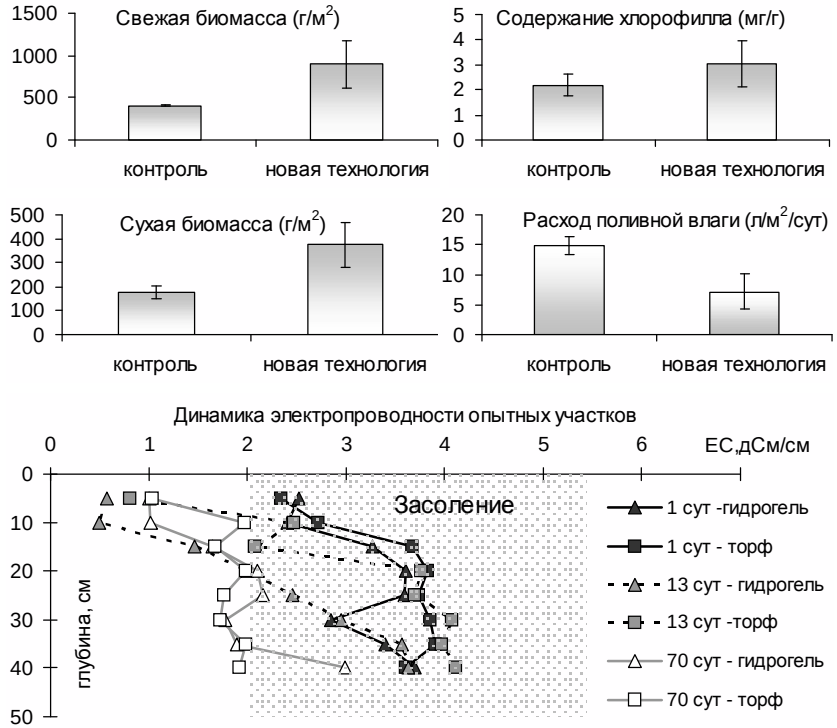


Рис. 8.3. Результаты тестирования технологии выращивания зеленых газонов на слоистых почвенных конструкциях с природными (низинный торф) и синтетическими (гидрогель) биополимерами (по [Смагин и др., 99, 2008]).

Эксперимент проводился в экстремальных климатических условиях летнего периода, когда суточная эвапотранспирация Paspalum vaginatum достигала максимальных величин. Поскольку полив в эксперименте осуществлялся по дефициту влаги, согласно данным о суточной эвапотранспирации, иногда приходилось использовать на наш взгляд несколько увеличенные нормы. Поэтому экономия поливных вод составила в начальный период 30% от общепринятых норм. В менее жаркое время года оказалось возможным о еще сильнее уменьшить расход влаги, достигнув 50-60% экономии, и полностью минимизировать сток влаги в нижележащие слои.

Табл. 8.1 Сравнительная оценка биомассы и содержания хлорофилла растений.

Участок	Содержание хлорофилла (мг/г сырой массы)			Запасы биомассы (г/м^2)	
	пигмент А	пигмент В	общее	сырой	сухой
А	1,12	0,70	2,18	398,4	195,2
В	1,93	1,57	4,32	1332,8	491,2
С	1,62	1,24	3,54	1353,6	609,6
Е	1,74	1,44	4,01	408,0	158,4

до минимума сток воды в нижние слои, но и препятствуют Контроль за солевым состоянием экспериментальных угодий показал устойчивую тенденцию рассоления верхней 30 см тощи почвы (рис.8.3). Так на участках «А», «В» и «С» электропроводность почвенных паст к концу эксперимента снизилась в 2-3 раза, достигнув в среднем в корнеобитаемой зоне 1,5 мСм/см, а для слоя 0-10 см - 0,5 мСм/см. В целом, на всей территории уровень общего засоления грунта по данным о его электропроводности не превышал допустимых значений. Для отмывки корневой зоны от солей допустимо применять один-два раза за сезон разовые большие нормы орошения. В данном эксперименте эта цель не была запланирована, однако внезапное выпадение ливневых осадков на 12 сутки эксперимента (рис. 8.1) послужило таким ирригационным импульсом, способствующим выносу солей за пределы верхней 30 см толщи. Поскольку предлагаемые конструкции почвы не только снижают ее капиллярному поднятию вместе с солями к поверхности, они служат надежным средством защиты от вторичного засоления.

Визуальное определение состояния растений на участках, данные по их биомассе и содержанию пигмента хлорофилла также подтвердили преимущество разработанной технологии (фото 14 (Приложение), рис. 8.3, табл.8.1). Размеры и масса кустов тестовой культуры на площадях «В» и «С» (варианты с гелем и торфом) в 2- 2,5 раза превышали таковые на контроле и участке, обработанном по технологии Муниципалитета. Наибольшее содержание зеленого пигмента было отмечено в варианте с использованием гидрогеля, а наименьшее на участке «А». В контрольном варианте несмотря

на высокий уровень хлорофилла биомасса растений была значительно меньше. Таким образом, эксперимент показал, что почвенные конструкции на базе отечественных природных и синтетических органогенных материалов позволили в условиях О.А.Э. снизить расход ирригационных вод на 30-50% при защите орошаемой территории от вторичного засоления и получить растительную продукцию Paspalum vaginatum в 2-3,5 раза выше по сравнению с контролем. Достигнутые результаты позволяют рекомендовать использование слоистых почвенных конструкций для выращивания газонной растительности в городских условиях аридного климата, а также при озеленении территорий мегаполисов гумидной зоны, где использование электролитов и техногенное загрязнение почв приводит к резкому ухудшению их экологического состояния.

Следующий пример со сплошными конструкциями под газонной растительностью относится к эксперименту, проведенному нами на испытательной станции Министерства муниципального и сельского хозяйства в Катаре (2005 г). Прибрежные территории большинства стран Персидского залива изобилуют конкреционными каменистыми включениями в верхней почвенно-грунтовой толще. Обычно при освоении земель эти включения отсеивают с использованием специальной техники и выбрасывают, а получаемый в ходе такой операции «сельскохозяйственный песок» используется под выращивание растительных культур. Мы предложили утилизировать природные каменистые включения, представленные щебнем 1-5см в диаметре, для производства ***противосолевых экранов в слоистых почвенных конструкциях*** (фото 12, Приложение). На фото показаны этапы реализации подобной конструкции и результаты выращивания на ней зеленого газона в экстремально жаркий период июля-августа 2005г. Амплитуда температур воздуха в этот период достигала 40^{o}C, поскольку в дневные часы термометр фиксировал максимальные значения 60-65^{o}C, а в ночные - 20-25^{o}C (рис. 8.5, 4,38 (глава 4)). Обычно озеленительные работы прекращаются на это время из-за низкой приживаемости растений и больших затрат на уход за ними. Нам удалось на сокращенном вдвое поливе за рекордно быстрый срок порядка 5 недель сформировать зеленый газон из отдельных экземпляров растений Paspalum vaginatum, используя

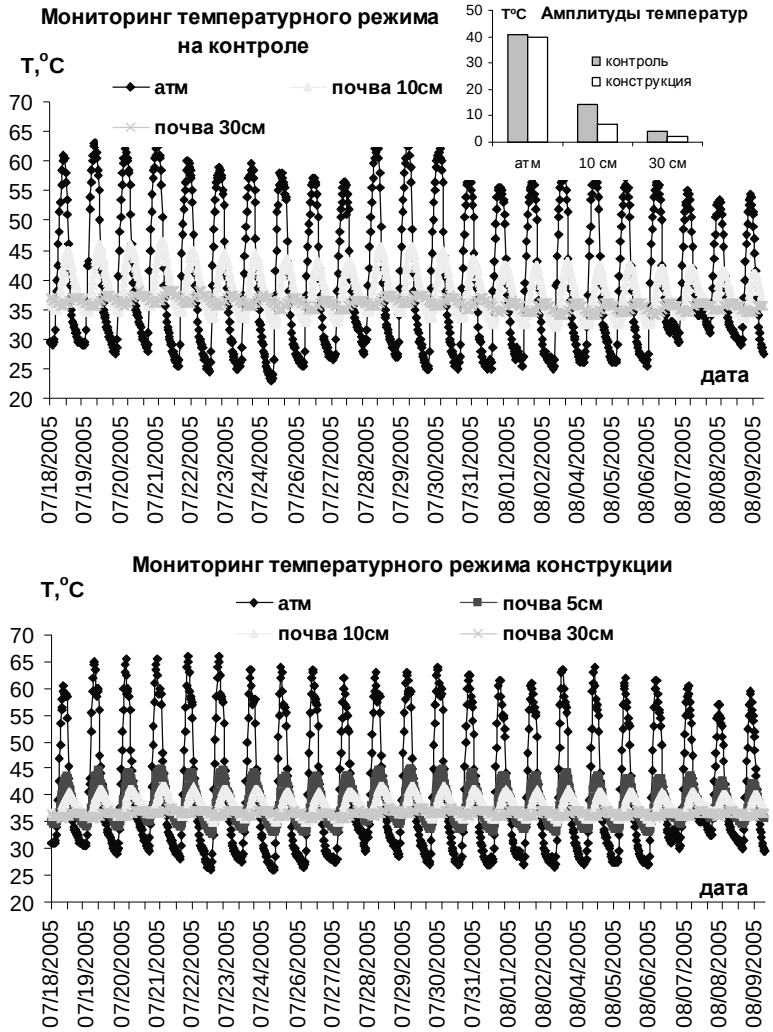


Рис. 8.5. Автоматизированный мониторинг температурного режима атмосферы, песчаной пустынной почвы и слоистой почвенной конструкции на ее основе (Катар, 2005г)

технологический способ «подвешивания влаги» над щебнистым экраном. К концу эксперимента биомасса газона составила 520 г/м^2 сухого вещества при высоких показателях содержания

хлорофилла (3,8 мг/г) и хороших эстетических качествах. Для увеличения влагоемкости отсеченной экраном 30см корнеобитаемой толщи в нее был внесен отечественный почвомодификатор «Arid Grow» на основе диспергированного торфа и сапропеля с минеральными добавками. Полив осуществлялся дождеванием по дефициту влаги с учетом транспирационных потребностей растения. На контрольных участках растительность была сильно угнетена, поскольку предложенной с учетом свойств конструкции единой нормы орошения не хватало для нормального водообеспечения травянистой культуры на обычной почве с высоким капиллярно-гравитационным оттоком влаги за пределы корнеобитаемого слоя.

Интересный факт был выявлен при анализе температурного режима контрольных участков и слоистой почвенной конструкции (рис. 8.5). При близких средних температурах на одинаковых глубинах были выявлены значительные отличия в амплитудах, а именно на сильные амплитуды температурных колебаний в первую очередь негативно реагирует рост и развитие растений и почвенных организмов. Оказалось, что слоистая конструкция почти вдвое уменьшает эту величину в корнеобитаемой толще. Так на контроле в песчаной аридной почве на глубине 10см амплитуда значений температуры (разность между максимальным и минимальным значением) составила 14,5^{o}C, а в том же горизонте почвенной конструкции всего 6,5^{o}C. На 30 см отметке эти величины были равными 4 и 2 ^{o}C, соответственно. При этом амплитуда температур атмосферного воздуха была одинаковой для обоих участков (40^{o}C). Это означает, что именно почвенная конструкция оказывает сглаживающее влияние на температурный режим корнеобитаемой зоны в экстремально жаркий летний период.

Для оптимизации солевого состояния почвенной конструкции необходимо было осуществить промывку ее рабочего слоя от водорастворимых солей-электролитов. Для начала в экспериментах с почвенными колонками была оценена интенсивность удаления солей из 30см корнеобитаемой толщи (рис. 8.6, верхний график). В качестве контролируемого показателя была задействована электропроводность

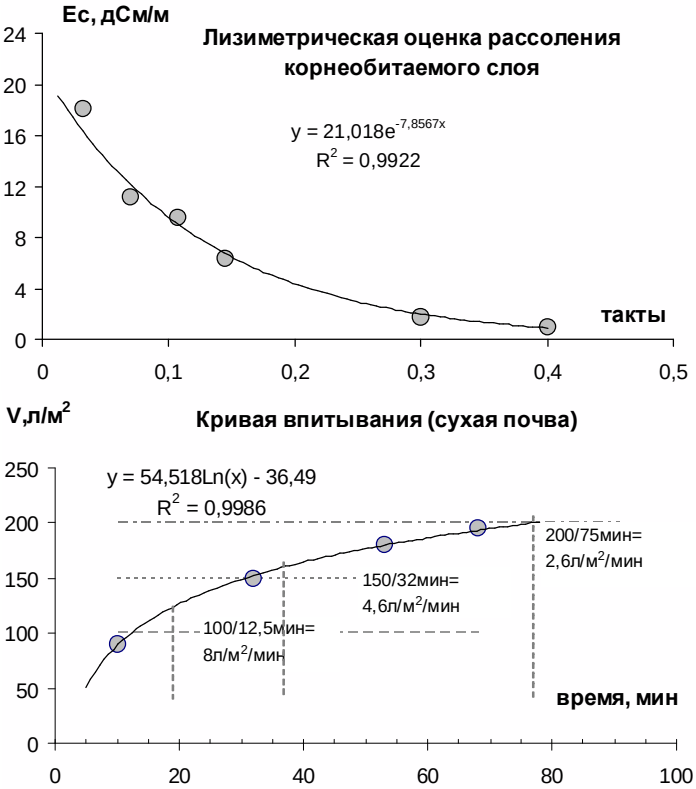


Рис. 8.6. Экспериментальное обеспечение технологии промывки почвы от водорастворимых загрязнителей.

лизиметрических вод на выходе из корнеобитаемого слоя в зависимости от числа тактов (смен порового раствора). Поскольку сельскохозяйственный песок, использующийся на экспериментальной станции Аль-Джазия имел невысокий исходный уровень засоления, оказалось достаточным разбавить поровый раствор менее чем наполовину (число тактов 0,4), чтобы на выходе из слоя получить такую же чистую воду как и на его поверхности с электропроводностью порядка 1дСм/м. Разовая промывная норма из расчета исходной электропроводности почвогрунта 4 дСм/м и допустимого уровня 2,5 дСм/м получается порядка 100 л/м^2, а полная промывная норма достигает 200 л/м^2. При этом важно подавать промывную

воду на поверхность так, чтобы не привести к образованию застоя влаги и растекания вбок за пределы участка.

Для определения скорости подачи воды в полевых условиях был проведен стандартный заливочный эксперимент [Вадюнина, Корчагина, 73], результаты которого в виде кривой впитывания представлены на нижней части рисунка 8.6. Очевидно, что при разовой промывке с нормой 100 л/м^2 (100 мм осадков или поливной влаги) скорость ее подачи должна быть не более 8 л/м^2/мин. При более высоких нормах эта величина быстро снижается, согласно полученной на графике логарифмической зависимости. В ходе реализации эксперимента с зеленым газоном на слоистой почвенной конструкции с щебнистым экраном удалось быстро достичь полного рассоления с выходом электропроводности на расчетную величину 2 дСм/м. На контрольном участке из-за эффекта вторичного засоления наблюдался капиллярный подъем (возврат) периодически вымываемых вглубь профиля солей обратно в корнеобитаемую зону.

Еще один пример касается ***технологии выращивания*** распространенной в аридных условиях кормовой травянистой культуры – ***люцерны***, при так называемом сплошном поверхностном увлажнении способом залива делянок водой. Опыт проводился на экспериментальной станции Министерства муниципального и сельского хозяйств Бахрейна в Манаме (2004-2005). По нашим рекомендациям на делянках (фото 11, Приложение) были созданы конструкции на базе российского органогенного почвомодификатора «AridGrow» (AG), который вносился в корнеобитаемый слой мощностью 10 см в концентрациях 5 и 10% и перекрывался сверху слоем исходного почвогрунта. Контролем служила фоновая окультуренная почва станции в виде так называемого сельскохозяйственного песка, просеянного от каменистых включений. Также производилось сравнение с традиционной технологией хозяйства, при которой в почву в качестве удобрения регулярно вносился куриный помет. Результаты тестирования приведены на рисунке 8.7.

Из иллюстрации видно, что продуктивность культуры была во всех вариантах довольно близкой и варьировала в зимний период от 200 до 240 ц/га, в летний от 160 до 180 ц/га и в целом за год от 360 до 430 ц/га, причем максимальные

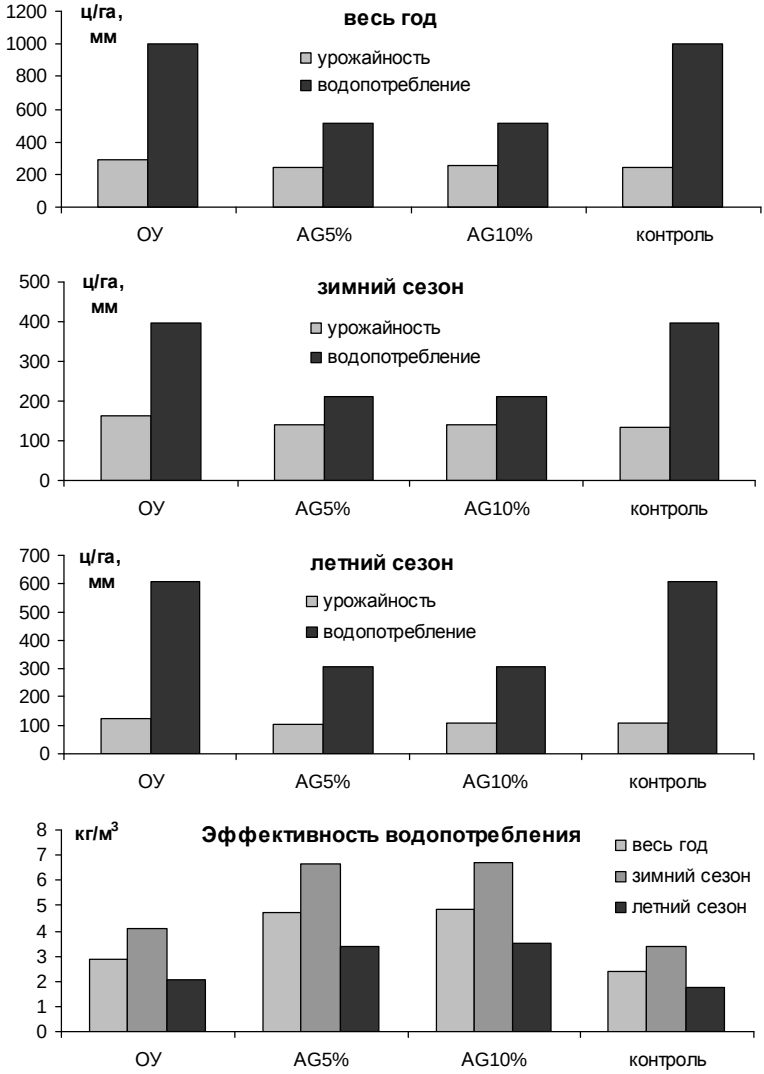


Рис. 8.7. Эксперименты по выращиванию люцерны на станции Министерства муниципального и сельского хозяйств Бахрейна (2004-2005)

величины стабильно отмечались в вариантах с удобрением птичьим пометом, а минимальные – на контроле. На конструкциях с почвомодификатором AG отличия

продуктивности от увеличения дозы в 2 раза не превышали 2-4 ц/га и были на границе статистической ошибки определения.

Несмотря на малые изменения в продуктивности, конструкции позволили добиться практически двукратной экономии оросительной влаги, а оно в традиционных технологиях выращивания этой культуры в аридных условиях очень большое (рис. 8.7). Как видно из иллюстрации на контроле и делянках с органическим удобрением (ОУ) годовое водопотребление составило 1000 мм (400 зимой и 600 летом). Наша технология снизила годовое водопотребление до 500 мм (200 зимой, 300 летом), сохранив при этом высокий уровень продуктивности. В результате эффективность водопотребления, рассчитанная как отношение урожайности к количеству поливной влаги (кг/м^3), в случае российской технологии AG оказалась самой высокой и достигала 6-7 кг/м^3 против 3-4 кг/м^3 на контроле и удобренном участке (рис. 8.7, нижняя диаграмма). Заметим, что уже относительно небольшая доза AG в 5% приводила к подобной экономии поливной влаги, что позволяет удешевить процедуру создания влагоаккумулятивных почвенных конструкций на базе этого почвомодификатора.

Заключительный пример (рис. 8.8) касается наиболее свежих данных комплексного полевого опыта, законченного в декабре 2008г на плантациях картофеля в Иордании (Arab International Company for Agricultural Development). Там по нашим рекомендациям при посадке картофеля в лунки засыпался торфяной почвомодификатор «Arid Grow» в разных количествах, после чего слой перекрывался природным песком. Таким образом, создавалась локальная слоистая конструкция, препятствующая растеканию влаги при точечном струйно-капельном орошении под куст растения. Эксперимент проводился по классической схеме полевого опыта с выравниванием прочих условий в вариантах с разными дозами почвомодификатора от 100 до 300 см^3/куст и четырьмя нормами полива -125 150, 170, 200 мм. Контролем служили делянки, возделываемые по традиционной технологии с внесением минеральных удобрений и нормой полива 400мм.

Использование нового технологического приема позволило в среднем увеличить на 20-30% урожайность картофеля при его высоком качестве и 95-98% товарности (фото

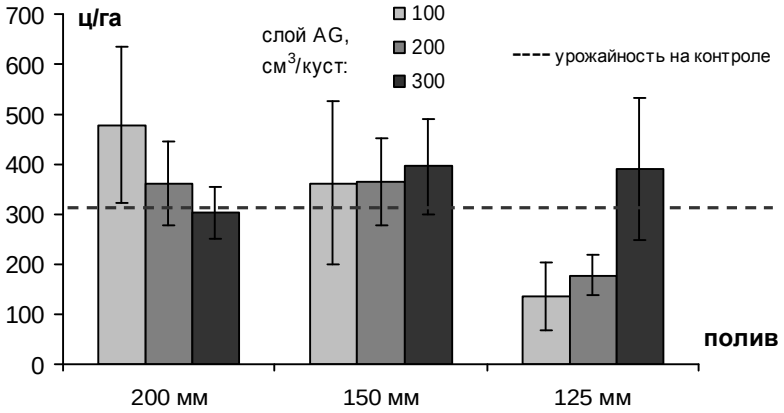


Рис. 8.8. Влияние нормы полива и количеств торфосапропелевого влагоадсорбента «Arid Grow» на урожайность картофеля (Иордания, 2008).

15, Приложение, рис. 8.8). При этом удалось сократить расходы поливной влаги на 50% (200 мм вместо 400) с наиболее эффективным использованием малой дозы почвомодификатора (100 $см^3$). Дальнейшее снижение поливной нормы до 150мм позволило удержать урожай выше фонового на всех вариантах эксперимента со слоями влагопоглотителя. При минимальном количестве влаги (125мм или 30% от традиционной нормы) в большинстве случаев урожай упал существенно ниже контроля, однако в варианте с высокой дозой влагопоглотителя он остался стабильным и превысил контроль на 15-20%. Таким образом, во всех полевых испытаниях, проведенных в аридных климатических условиях стран Персидского залива, была показана высокая эффективность разрабатываемых технологических приемов повышения влагоемкости почв с использованием слоистых почвенных конструкций. Принцип разрыва гидравлической связи и «подвешивания» влаги в почве может с успехом использоваться при организации поливного земледелия на малых территориях, поскольку он не только позволяет значительно экономить поливную влагу при стабильно высокой продуктивности растений, но и защищать поливные земли от вторичного засоления и техногенного загрязнения корнеобитаемого слоя почвы.

8.2. Предварительные эксперименты в УОПЭЦ МГУ «Чашниково»

Для научного обоснования и экспериментального исследования ***технологического приема «подвешивания» почвенной влаги*** и питательных веществ в корнеобитаемой толще в условиях гумидного климата были проведены соответствующие исследования со слоистыми почвенными конструкциями в УОПЭЦ МГУ «Чашниково» [Смагин и др., 2008]. На созданных конструкциях и контрольной площадке проводился опыт по определению остаточной после гравитационного стекания влаги стандартным методом заливных площадей для определения наименьшей влагоемкости почв [Вадюнина, Корчагина, 73]. На рисунке 8.9 приведены кривые квазиравновесного распределения влажности на вторые сутки после гравитационного оттока в контрольной легкосуглинистой почве, подстилаемой флювиогляциальными песками и в пяти вариантах слоистых почвенных конструкций на ее основе (см. гл. 7). Как видно из анализа водоудерживающей способности почвенных конструкций, внедрение слоев грубодисперсного материала (щебня) позволяет «подвесить» влагу в гор. $A_{пах}$ в количествах существенно превышающих таковые для исходной почвы. Средняя величина наименьшей влагоемкости в исследуемом слое исходной (контрольной) почвы достигает величины 19,8 ± 2.3%. В вариантах 3 и 4 с закладкой щебнистых экранов на глубине 10 и 30 см полевые влагоемкости вышележащих легкосуглинистых горизонтов достигли величин 30,3 ± 1.2% и 24,6 ± 2.0% соответственно. Из этого результата следует, что внесение грубодисперсного щебнистого материала, как и ожидалось, позволяет «подвесить» влагу в вышележащем горизонте и добиться значительного увеличения влагоемкости. Так для слоя 0-10 см влагоемкость гор. $A_{пах}$ увеличивается ≈ на 10 весовых процентов. При заглублении экрана на 30 см, влагоемкость закономерно снижается, но все равно остается выше контроля практически на 5%. При этом никакие гигроскопические материалы в почву не вносились. Физический смысл происходящего – недостаточная мощность единого(гидравлически связного) водного тела и соответственно

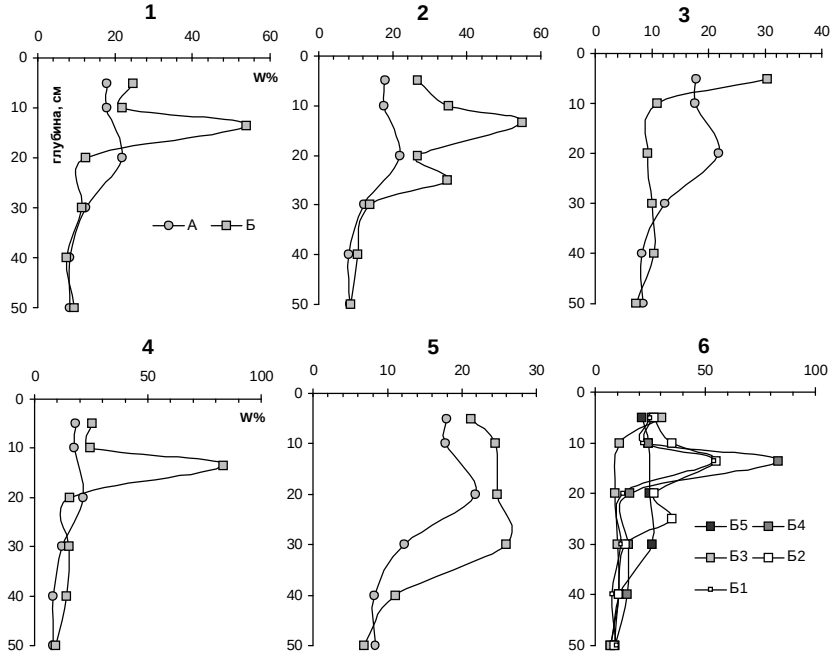


Рис. 8.9. Распределение влаги после гравитационного оттока и наименьшая влагоемкость (НВ) слоистых почвенных конструкций в УОПЭЦ МГУ «Чашниково» (по [Смагин и др., 2008]. А – контроль, Б1-5 различные варианты почвенных конструкций

его низкое гравитационное давление, недостаточное для преодоления капиллярных сил, действующих на воду со стороны твердой фазы. Таким образом, внедрение грубодисперсного экрана на определенную глубину в слой почвы вместо дренажа может приводить к обратному ***эффекту «антидренажа»*** – аккумуляции влаги, что следует учитывать в технологиях почвенного конструирования.

В частности, известные рецепты для дренирования спортивных площадок (газонов), поверхностных и подземных коммуникаций с использованием щебнистых экранов должны обеспечиваться обязательным инженерным расчетом глубины залегания грубодисперсного материала с учетом водоудерживающей способности (ОГХ) вышележащих

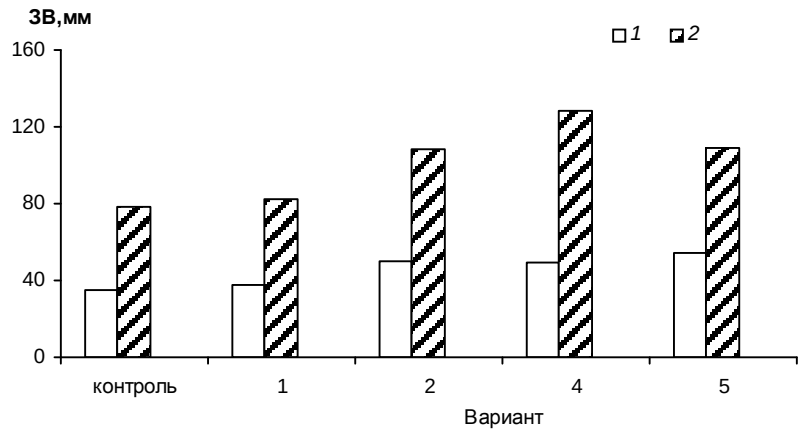


Рис. 8.10. Запасы влаги при НВ в дерново-подзолистой почве (контроль) и в различных вариантах слоистых почвенных конструкциях подмосковного объекта УОПЭЦ МГУ «Чашниково». Слои: 1 – 0-20 см, 2 – 0-50 см.

почвенных материалов. При отсутствии моделей типа HYDRUS, позволяющих производить прогноз поведения почвенной влаги в слоистых системах и проектировать почвенные конструкции (см. главу 2), можно воспользоваться следующей физически-обоснованной оценкой [Смагин и др., 2008]. Откладывая в качестве секущей на кривых ОГХ величину потенциала (давления) влаги, соответствующую этой глубине, можно прогнозировать влагоемкость верхнего слоя, то есть его наиболее вероятное состояние после сильного увлажнения с поверхности и оттока гравитационной влаги. Нетрудно убедиться (см, например, рис. 6.2), что лишь для легких почв с низкой водоудерживающей способностью глубина сплошного дренажа (грубодисперсного экрана) порядка 20-30 см (потенциал 2-3 Дж/кг) будет достаточна для гравитационного оттока влаги и осушения вышележащей толщи до технологически приемлемых величин 10-15% влажности. Для почв и композитов тяжелого гранулометрического состава, органических материалов с повышенной водоудерживающей способностью, такой глубины будет явно недостаточно. Вместо ожидаемого дренажа в них будет аккумулироваться

подвешенная влага в количестве, приближающемся к полной влагоемкости (состоянию насыщения).

Способ аккумуляции влаги в почвах внедрением грубодисперсных экранов впервые был предложен нами при разработке технологий устойчивого поливного земледелия проекта «AridGrow» для стран Персидского залива (см. предыдущий раздел). Одновременно этот технологический прием позволяет избавиться от проблемы вторичного засоления и техногенного загрязнения корнеобитаемой толщи, поскольку, разрывая капиллярную связь, грубодисперсный экран устраняет возможность подъема влаги с растворенными вредными веществами из нижележащих горизонтов в поверхностные «рабочие» слои, где сосредотачиваются корни растений. Для повышения плодородия и водоудерживающей способности таких слоев можно дополнительно вводить в них органогенные почвомодификаторы на основе природных(торф, сапропель, компосты, гуматы) или синтетических (сильнонабухающие полимерные гидрогели) биополимеров.

Как видно из результатов полевого эксперимента с аналогичными конструкциями в условиях УОПЭЦ «Чашниково», внедрение в почву 1-2 слоев торфа резко (на 20-30 весовых процента) повышает влагоемкость исходной толщи (рис.8.9). Максимальная влагоемкость (порядка 80%) отмечается для варианта конструкции с комбинацией торфяного слоя и грубодисперсного экрана, рекомендованного нами ранее в качестве базового для озеленения муниципальных и приватных объектов особой значимости в странах Персидского залива [Смагин, 2006].

Поскольку весовая влажность (влагоемкость) не дает полной информации о реальном количестве доступной для растений влаги в почвах, особенно с контрастными по текстуре и плотности слоями (материалами), дополнительно для исследуемых вариантов почвенных конструкций были рассчитаны запасы влаги (рис. 8.10). Как видно из диаграмм, наибольший влагоаккумулятивный эффект достигается во 2, 4 и 5 вариантах конструкций, где запасы влаги, по сравнению с контролем возрастают в 1,4-1,6 раза. Внедрение торфяных прослоев (1,2,4) и щебнистых экранов (3,4,5) позволяет увеличить запасы влаги во всей рабочей толще 0-50 см, доводя

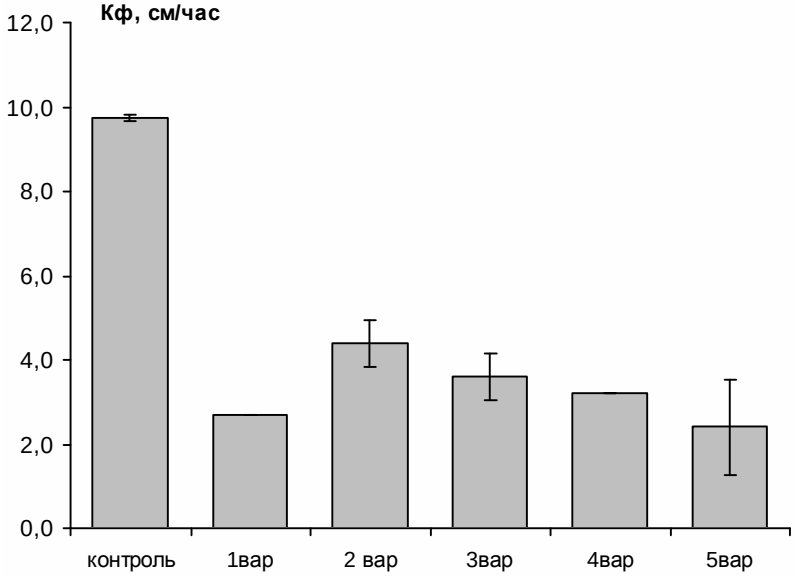


Рис. 8.11. Коэффициенты фильтрации в почве и слоистых почвенных конструкциях подмосковного объекта УОПЭЦ МГУ «Чашниково».

их до уровня таковых в суглинистых зональных почвах [Вадюнина, Корчагина, 73]. Интересно, что использование грубодисперсного экрана (щебня) на глубине 30 см (вариант 5) даже несколько превышает по результатам, казалось бы значительно более «емкий» вариант с двумя слоями торфа – органогенного влагопоглотителя (вариант 2). Здесь следует, конечно, учесть, что торф переслаивался песчаным материалом, уступающим по водоудерживающей способности легкому суглинку пахотного горизонта. Поэтому даже два слоя торфяного влагопоглотителя не смогли в сумме превысить водоудерживание легкого суглинка мощностью 30см. Последний, будучи отрезан щебнистым экраном от капиллярного рассасывания влаги вглубь почвы, продемонстрировал наибольшую водоудерживающую способность по сравнению с исходной (контрольной) почвой, где такой же слой (А пах) мощностью 30см залегал на

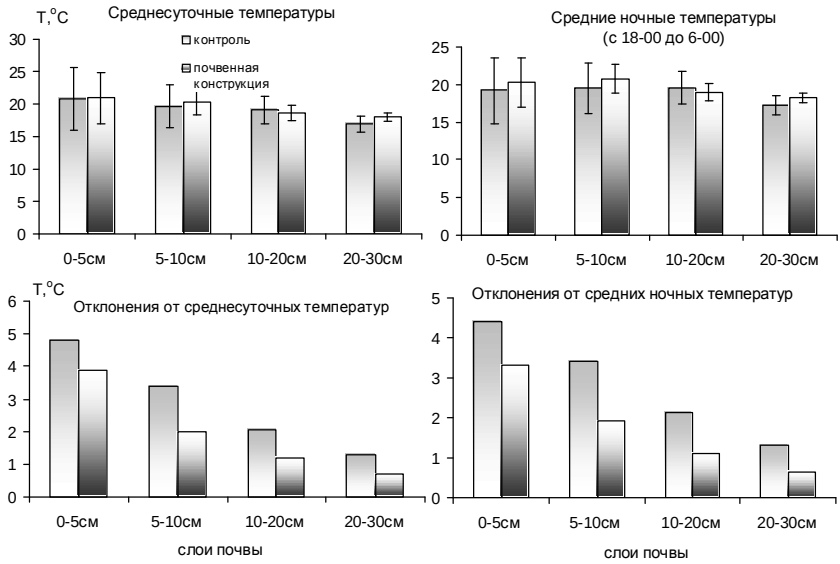


Рис. 8.12.. Температурный режим исходной почвы и почвенной конструкции с двумя прослоями торфа (вариант2). подмосковного объекта УОПЭЦ МГУ «Чашниково». Мониторинг 0.7-13.10.2007г датчиком DS 1922L с шагом 10 мин.

флювиогляциальном песке, по-видимому, обеспечивающем небольшой капиллярный отток.

Таким образом, при наличии исходно удовлетворительной способности почвы к водоудерживанию (легкий суглинок), ее можно повысить внедрением грубодисперсного материала на расчетную глубину без использования дополнительных почвомодификаторов – поглотителей влаги. Грубодисперсный экран создаст надежную защиту от вторичного засоления, а при периодических промывках вышележащей толщи, позволит в кратчайшие сроки избавиться от вредных растворимых веществ в корнеобитаемом слое. Для легких почв с исходно низким водоудерживанием, помимо экрана требуется внесение влагопоглощающих органогенных материалов. Здесь можно порекомендовать варианты 2-3-слойных конструкций с расположением в нижней части щебня, а в верхней – торфяных,

торфосапропелевых почвомодификаторов или полимерных гидрогелей. При этом слоистый способ закладки материалов предпочтительнее их перемешивания, так как позволяет наряду с увеличением водоудерживающей способности снизить фильтрацию влаги. В частности, заливочные эксперименты, проведенные на исследуемых в работе вариантах слоистых конструкций, показали, что скорости впитывания влаги и результирующие коэффициенты фильтрации снижаются в 3-4 раза по сравнению с таковыми в исходной почве (рис. 8.11).

Конструкции меняют температурный режим в почве, как показали эксперименты с автоматизированным контролем распределения температур в суточном ходе методом программируемых датчиков DS1921. Результаты их статистической обработки приведены на рисунке 8.12. Температурный режим конструкций с торфяными прослоями оказывается более благоприятный, чем в исходной дерново-подзолистой почве. Конструкции аккумулируют на 1-2^{o}C больше тепла, особенно а ночное время, и сглаживают в 1,5-2 раза амплитуды суточных колебаний температуры в различных слоях корнеобитаемой толщи. Вывод о стабилизации температурного режима полученный не только в данном эксперименте, но и в аналогичных опытах на станции Аль-Джазия в Катаре (см. предыдущий раздел, рис. 8.5) дает основание считать это важное свойство универсальным как для аридных, так и для гумидных климатических условий.

В завершении раздела стоит отметить, что рассмотренные выше закономерности и технологические способы подвешивания влаги будут действовать лишь в определенных условиях. Без организации достаточно регулярных поливов, отсеченная щебнистым экраном толща может быстро иссушаться как с поверхности, так и изнутри. Этому будет способствовать отсутствие капиллярного подтока из глубинных горизонтов. И если корневые системы растений не успеют при развитии преодолеть щебнистый экран, первая же засуха погубит зеленые насаждения на таких конструкциях, причем с большей вероятностью, чем на обычных однородных почвах. Еще одно очевидное условие – достаточно тщательное выравнивание слоев и территории в целом при подготовке конструкции. В противном случае влага может перемещаться в

латеральном направлении и, собираясь в пониженных элементах участка, стекать в щебнистый экран. В целом, повторяем, эффективность слоистых конструкций с подвешиванием капиллярно-гравитационной влаги во многом зависит от организации системы мер по их эксплуатации, включая в первую очередь снабжение влагой в условиях постоянной или периодической засухи.

8.3. Основной эксперимент на стационарном объекте в ЗАО г. Москвы.

Перейдем к анализу результатов основного полевого опыта, предпринятого в соответствии с ТЗ Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10а на стационарных площадках с подготовленными научно-обоснованными вариантами почвенных конструкций для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой (ЗАО г Москвы, Сев. Крылатское, Серебряноборское опытное лесничество, июль-сентябрь, 2010). На рисунках 8.13-8.14 приведены результаты автоматизированного ***мониторинга гидротермических параметров*** (температуры и относительной влажности воздуха) объектов наблюдения за период с 29.07. по 30.08 2010 посадки и выращивания газонной растительности. Их анализ указывает на экстремальные климатические условия в этот период в столичном мегаполисе, приближающиеся к таковым в рассматриваемых выше аридных странах пустынь Аравийского полуострова (сравн. рис. 4.5). Основной период эксперимента вплоть до 20-х чисел августа характеризовался максимальными значениями температур, превышающими 40^{o}C в тени с амплитудой суточного хода более 25^{o}C! При этом влажность воздуха (RH) в дневные часы опускалась за отметки 20%, также типичные лишь в аридных условиях пустынь (рис. 4.13-4.14). На этом фоне транспирационные расходы газонной растительности выходили на максимальные значения порядка 6-7мм/сут (рис. 4.16), и без формирования необходимого запаса влаги в почве, выращивание газонов становилось невозможным. Вместе с тем именно условия засухи позволяют рельефно отразить преимущества влагоаккумулятивных почвенных конструкций перед традиционными способами озеленения в

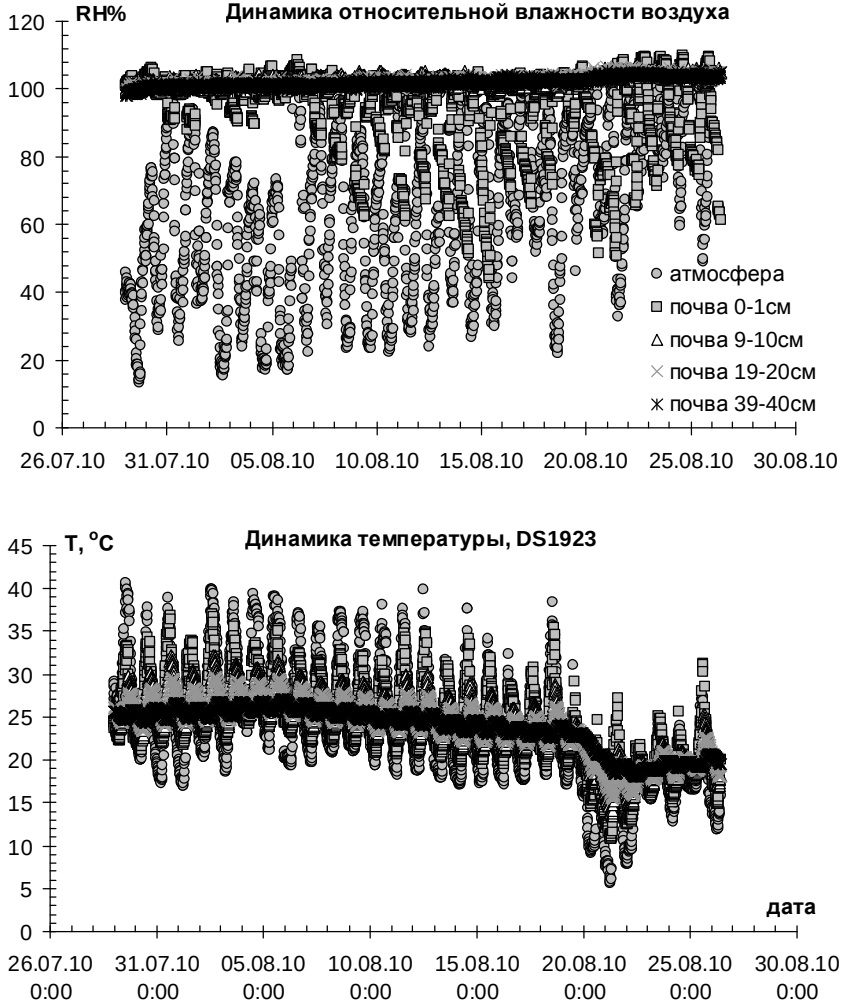


Рис. 8.13. Мониторинг гидротермических показателей на основном объекте (контрольная площадка).

мегаполисе.

Наблюдения за ***температурным режимом*** контрольной почвы и наиболее сложного варианта почвенной конструкции с двумя торфяными прослойками и щебнистым экраном выявили

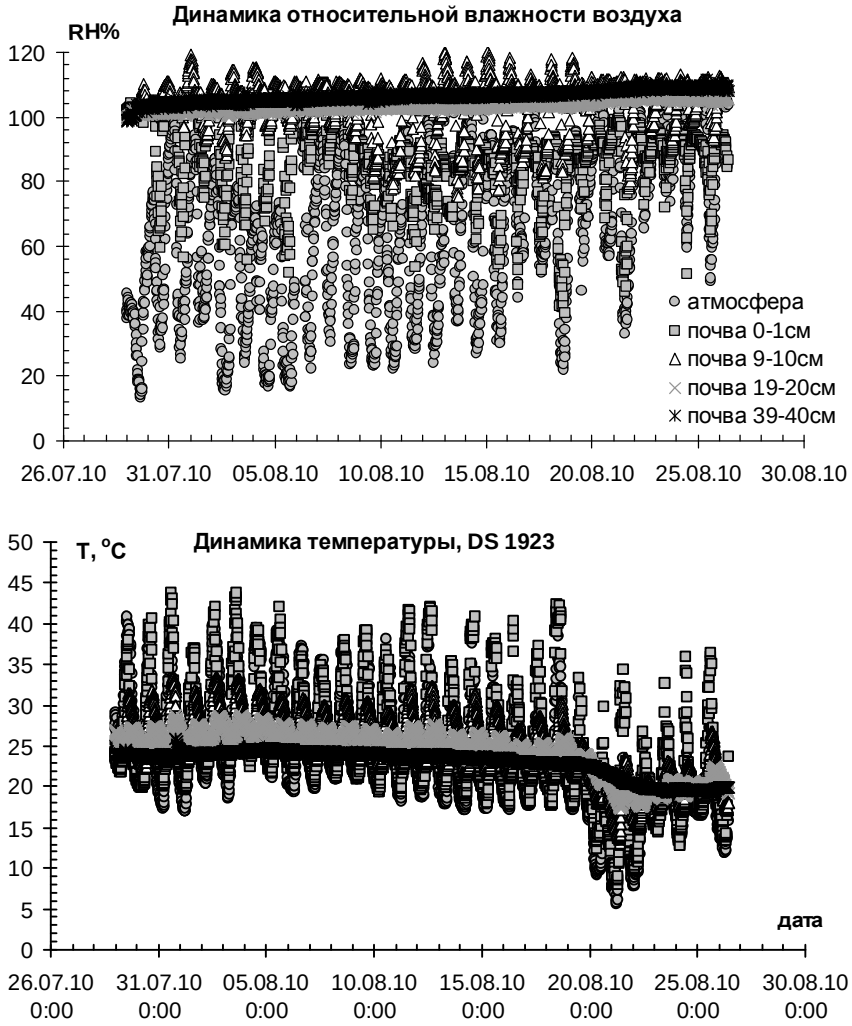


Рис. 8.14. Мониторинг гидротермических показателей на основном объекте (трехслойная почвенная конструкция).

ряд различий (рис. 8.13-8.15). Несмотря на то, что средние температуры за весь период наблюдений были близкими и во всей почвенной толще 0-40см мощности варьировали в узком

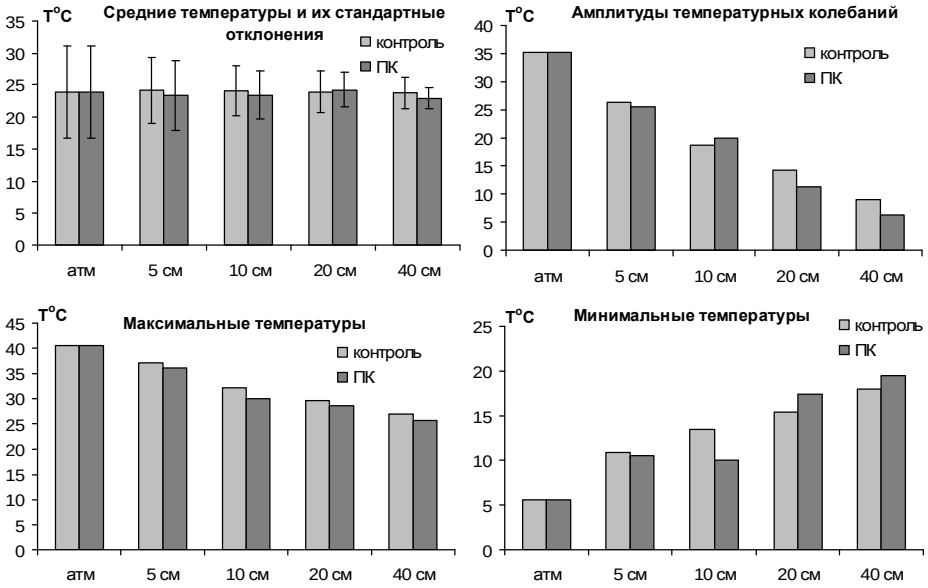


Рис. 8.15. Сравнительный статистический анализ температурных характеристик контрольной почвы и почвенной конструкции.

диапазоне 23-24°С (высокие температуры, согласно градациям табл. 3.2, см. главу 3), конструкция, как и в рассмотренных ранее случаях (рис. 8.5, 8.12) оказала сглаживающее влияние на контрастность температурных колебаний. Максимальные температуры во всех исследуемых горизонтах оказывались на 1-3 градуса ниже в почвенной конструкции по сравнению с контролем. Минимальные – снижались в поверхностном слое 0-10см, но повышались в более глубоких слоях 20-40см. По-видимому, это происходило за счет охлаждающего эффекта почвенной влаги, накопленной в первом торфяном слое на глубине 10см, и его теплоизоляционными свойствами для нижележащей толщи. В целом при внедрении торфяных слоев амплитуды температурных колебаний понижались в 1,3-1,5 раза, что способствовало сглаживанию контрастности температурного режима корнеобитаемой зоны в почвенной конструкции по сравнению с контрольной дерново-(урбо)подзолистой почвой участка (рис. 8.15).

Анализируя общий ход температурного режима, отметим, что в 20-х числах августа наступила резкая смена погодных условий (рис. 8.13-8.14). Буквально за 1-2 суток температура скачком понизилась на 10-15^{o}C, достигнув обычных для этого периода в условиях умеренного гумидного климата величин. Такой же скачок произошел и в почве с переходом от градации высокой температуры (>20^{o}C) к теплой (15-20^{o}C).

Относительная влажность воздуха в поверхностных слоях (0-1, 9-10 см) почвы на контроле была стабильно выше по сравнению с таковыми в почвенной конструкции, несмотря на одинаковые условия полива в первой половине эксперимента и поступления дождевых осадков – во второй. Мы связываем это явление с повышенным испарением влаги из почвы контрольного участка, обладающей беспрепятственным капиллярным механизмом переноса влаги к испаряющей поверхности. Слои – экраны в почвенных конструкциях или искусственная гидрофобизация нарушали вплоть до уничтожения подобное проявление капиллярных эффектов, способствуя консервации влаги в почвенных конструкциях и снижению непродуктивных потерь на испарение и гравитационное стекание. Поэтому в верхнем слое в процессе суточного хода здесь наблюдались изменения относительной влажности воздуха с дефицитом в 10-20% в дневные часы, когда отсутствие подтока из глубинных слоев к испаряющей поверхности не могли компенсировать иссушение (рис. 8.14).

На контрольном участке резкие перепады относительной влажности в слое 0-1см начались лишь после прекращения искусственных влагозарядковых поливов в первых числах августа (рис. 8.13). Дефицит почвенной влаги, обусловленный ее гравитационным оттоком и транспирацией активно прирастающей массы газона, не позволил компенсировать полностью ее потери на испаряющей поверхности в дневные часы. Отсюда возник подобный суточный ход величины RH с амплитудой до 40%.

Перейдем к анализу ***водно-воздушного режима*** корнеобитаемого слоя на участках с различными вариантами почвенных конструкций (рис. 8.16). Сильная засуха в июле – начале августа 2010 г привела к тому, что на фоновых участках

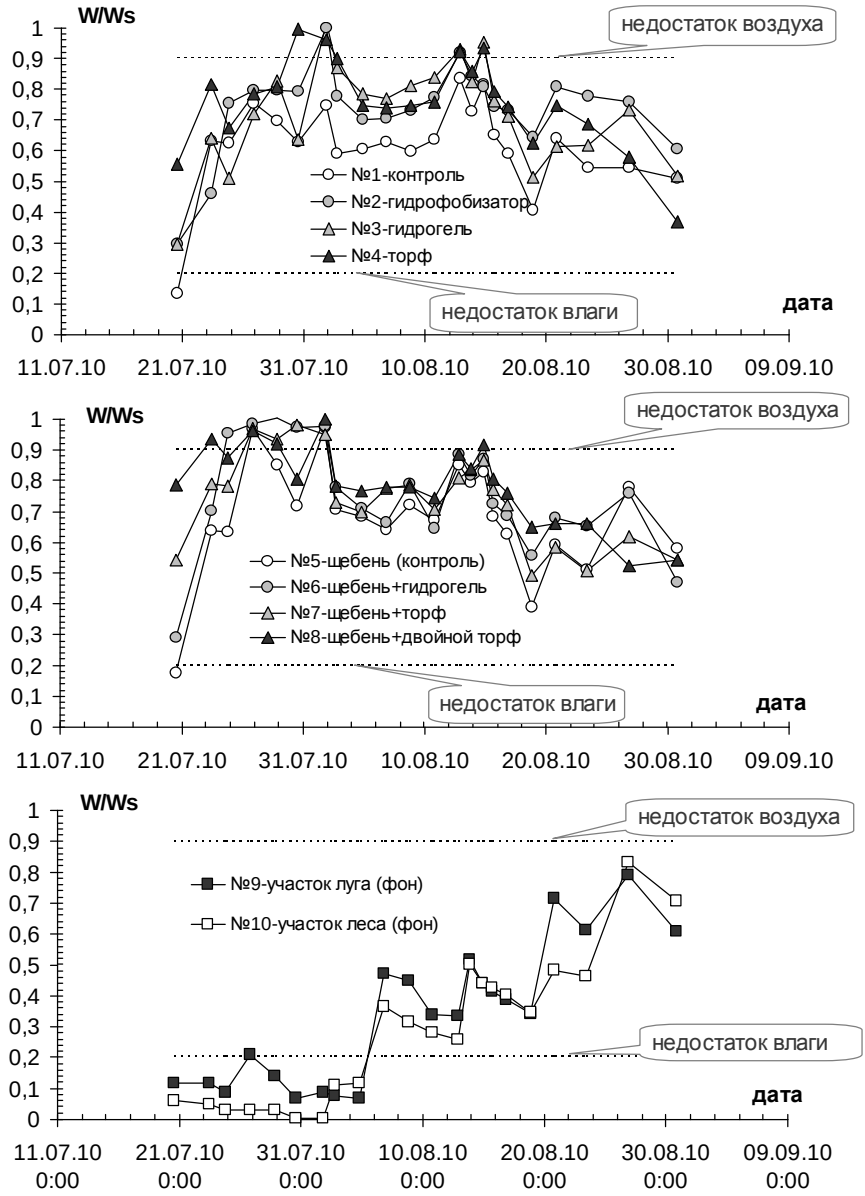


Рис. 8.16. Гравиметрический мониторинг водно-воздушного режима поверхностного слоя почв и почвенных конструнций основого объекта.

объекта влажность почвы опустилась ниже критических отметок (W/W_s<0,2), соответствующих состоянию устойчивого завядания травянистых культур с неглубокой корневой системой (рис. 8.16, нижняя часть). И действительно, травянистая растительность на фоновых участках была сильно угнетена, как и все неорошаемые московские газоны в этот период. Их надземная фитомасса засохла, и лишь травы с глубокими корневыми системами, не подверженные кошению, продолжали вегетировать. Поскольку почва под лесом сильнее иссушается в жаркое время из-за большей концентрации корней множества видов растений, влажность почвы под бором в этот период была несколько ниже, чем под лугом.

К концу первой декады августа пошли первые дожди, которые вывели влажность поверхностного слоя на уровень выше критического. Пилообразный характер динамики показателя W/W_s фоновых участков в этот период отражает импульсы увлажнения почвы атмосферными осадками и последующее испарение.

На контрольном участке и вариантах почвенных конструкций в засушливый период производилась серия влагозарядковых поливов, поэтому влажность верхнего корнеобитаемого слоя здесь была значительно выше, чем на фоновых территориях объекта (рис. 8.16). На период полива она даже иногда превышала верхнюю границу оптимума по критерию W/W_s, в особенности на вариантах почвенных конструкций с подстиланием щебнем, где аккумулировалось дополнительное количество влаги за счет описанного ранее эффекта «антидренажа». Однако при естественных осадках этот показатель практически не выходил за пределы оптимума, варьируя от 0,4 до 0,9. Это означает, что корневые системы были все время снабжены необходимым для устойчивого роста и развития растений газона количеством почвенного раствора.

При сравнении различных вариантов конструкций и контроля выявились значительные преимущества разработанной технологии (рис. 8.16). Влажность корнеобитаемого слоя почвенных конструкций была стабильно выше таковой для контрольных участков, что при одинаковом увлажнении свидетельствует о реализации запланированных при расчете параметров конструкций технологических свойств по

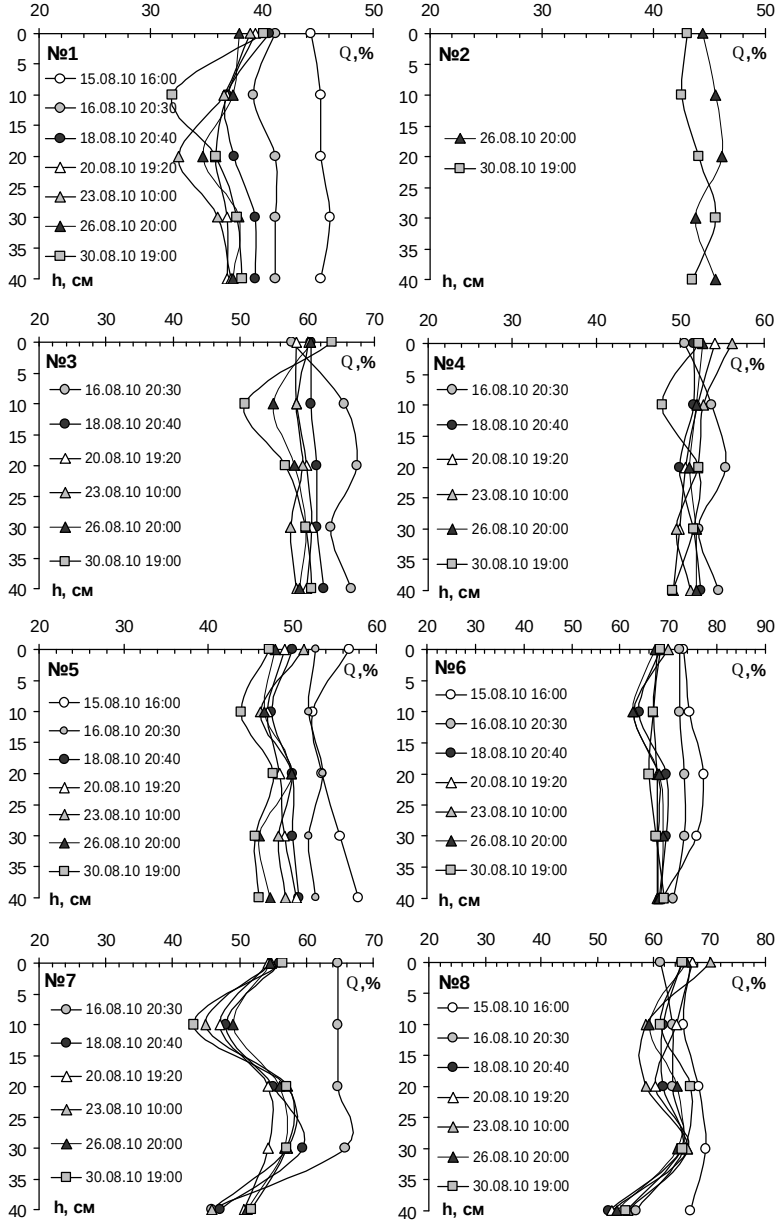


Рис. 8.17. Динамика профиля объемной влажности в съемных монолитах почв и почвенных конструкций (обозн см. рис. 8.16).

водоудерживанию. Как и ожидалось, внесение почвомодификаторов-биополимеров с высокой удельной поверхностью увеличивало вдодоудерживающую способность и равновесную влажность корнеобитаемого почвенного слоя. Вместе с тем и прокладка на расчетной глубине щебнистого экрана также способствовала этому, в чем несложно убедиться, сравнивая значения показателей влажности двух контрольных площадок (варианты №1 и № 5). Наивысшие значения индекса W/W_s демонстрировали варианты с гидрогелем и слоями торфа.

Еще более рельефно различия между вариантами конструкций и контрольных площадок проявились в экспериментах с почвенными монолитами (рис. 8.17 - 8.18). Профильные распределения объемной влажности в монолитах отражают постепенное ее уменьшение после насыщения влагой (заливочный эксперимент). Как и предсказывалось теоретическими расчетами по моделям энерго-массообмена в почвах (см. главу 5), гравитационный отток прекращался в течение 1-2 суток, и далее изменения влажности происходили только за счет эвапотранспирационных потерь или поступления дождевых осадков на верхней границе. Равновесные влажности в вариантах с почвенными конструкциями достигали 50-70% по объему были стабильно ваше, по сравнению с контрольными (30-40%). Наибольшие значения демонстрировали конструкции с органическими влагопоглотителями природного и синтетического генезиса, подстилаемые щебнистым экраном. Интегрирование профильных распределений объемной влажности по глубине позволило оценить ***запасы влаги в почвах и почвенных конструкция***х на объекте (рис. 8.18). Как видно минимальная водоудерживающая способность, и, соответственно, самые малые запасы влаги были свойственны контрольной дерново-(урбо)подзолистой почвы участка. Они не превышали 150мм, что, впрочем, было весьма много и отражало хороший исходный уровень культивации этой почвы в период использование под огородную растительность. Самый дешевый и нетрудоемкий метод оптимизации в виде использования раствора гидрофобизатора (вариант №2) позволило увеличить запасы в 1,2, а прокладка щебневого экрана (вариант №3) – в 1,3 раза. Торфяной слой влагопоглотителя 10 см мощности увеличил запасы влаги в 1,4 раза на контроле и в 1,5 раза на

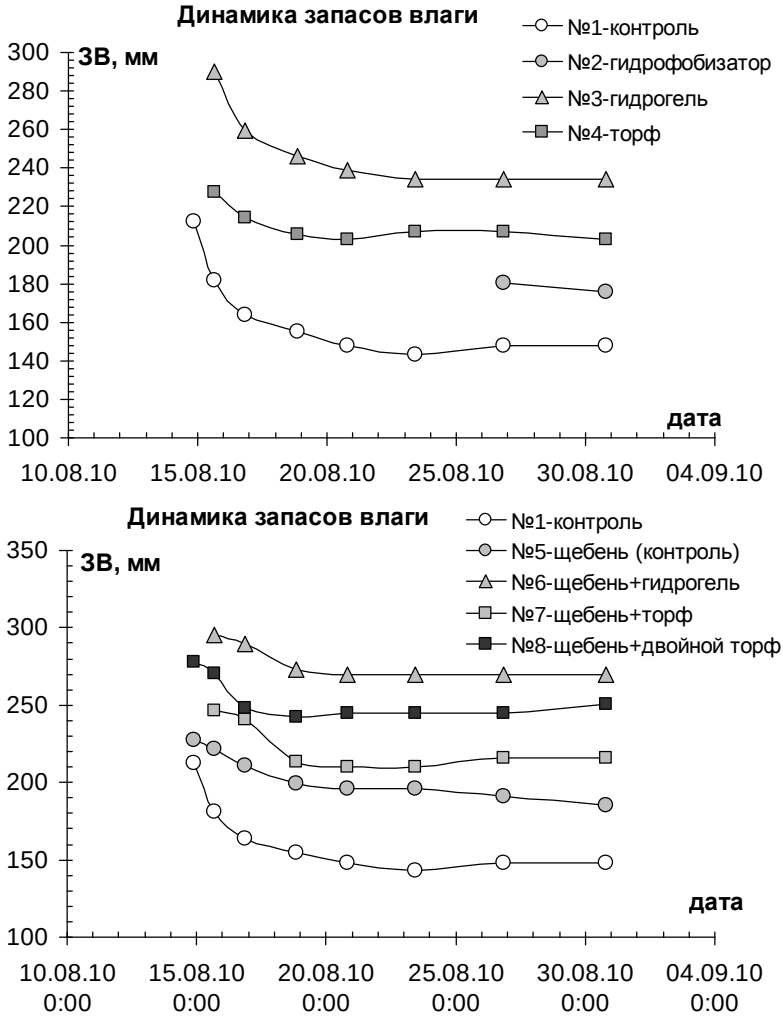


Рис. 8.18. Динамика профильного распределения объемной влажности в съемных монолитах почв и почвенных конструкций.

площадке, подстилаемой щебнем. Конструкция с двумя слоями торфа (№8) над щебнистым экраном увеличила влагозапас в 1,7 по сравнению с контролем (№1) и в 1,4 раза по сравнению с вариантом, где использовался только щебень (№5). Наиболее

эффективным поглотителем влаги оказался гидрофильный синтетический почвомодификатор в виде сильнонабухающего полимерного гидрогеля (варианты №3 и №6). Слой 0,2% гидрогеля в супесчаной почве увеличивал ее влагозапас в 1,6 раза, а аналогичная конструкция со щебнистым экраном – в 1,8 раза! По эффективности это означало перевод супесчаной почвы в целинный чернозем по характеристике водоудерживания.

Поскольку ***продуктивность растительных культур*** напрямую определяется запасами почвенной влаги, обеспечивающими транспирацию и процесс фотосинтеза с фотолизом воды, резонно было ожидать соответствующих закономерностей в развитии газона и его биомассе. Расчеты на проектной стадии прогнозировали продуктивность газонов порядка 30-50 ц/га фитомассы (см. главы 1, 5). Несмотря на экстремальные климатические условия на делянках с почвенными конструкциями удалось выйти на этот уровень (рис.8.19) за сравнительно небольшой срок полевого эксперимента.

Сухая фитомасса (продуктивность) газона на контроле не превысила и 11-12 ц/га, а во влажном состоянии – 12 т/га. При этом основная часть массы была представлена корнями. Это вполне понятно, поскольку дефицит влаги в верхнем слое почвы не позволял газону реализовывать максимальный и пропорциональный рост. В поисках влаги растение пыталось развить корневые системы, но энергии фотосинтеза хватало лишь на то, чтобы укорениться лишь в 3см слое, так как несмотря на большие суммарные запасы, влага была расположена на удалении от поверхности, и дойти корни до нее без дополнительного прироста не смогли. Использование гидрофобизатора (вариант №2) способствовало концентрированию определенной части влаги в приповерхностном слое, в результате чего фитомасса, получив дополнительное водно-минеральное питание, возросла в 1,5 раза, достигнув в сухом эквиваленте 18 ц/га, а во влажном – 20 т/га (рис. 8.19). При этом возросла длина корней, но уменьшилась их доля в общей фитомассе, где травостой составил более половины веса.

Несколько большие величины продуктивности и биометрических показателей продемонстрировали варианты

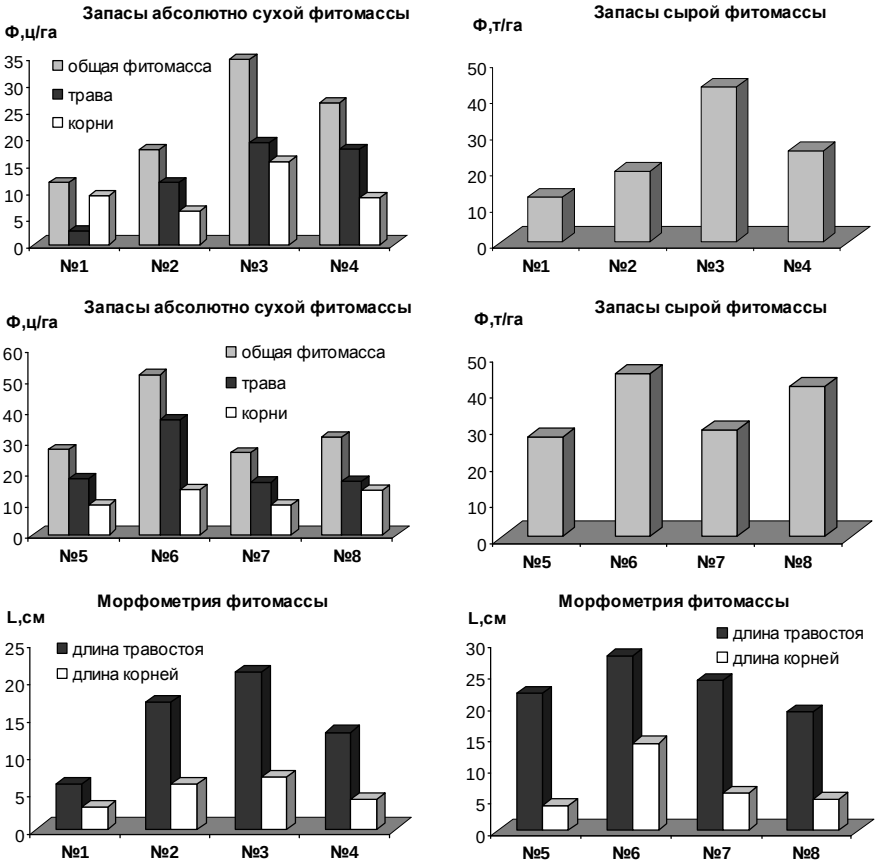


Рис. 8.19. Характеристика фитомассы и морфометрические показатели газонной травы (обозначения см. рис. 8.16).

газонов на конструкции со слоем торфа (№4), щебнистым экраном (№5), и одним слоем торфа в сочетании со щебнистым экраном (№7). Здесь сухая фитомасса превышала контроль в 2,3-2,4 раза, достигая 26-28 ц/га. Масса во влажном состоянии была выше в 2-2,3 раза и характеризовалась разбросом величин в 25-29 т/га. Напомним, что во влажную массу входил вес плохо отмытого песка и органических почвомодификаторов, плотно сцепленных с корнями, поэтому этот показатель следует рассматривать лишь в качестве ориентировочной оценки (см. гл. 3). В сухом состоянии масса травостоя всех вариантов

рассматриваемых почвенных конструкций превышала корневую массу в 1,3-2 раза, что и должно быть для дерновинных злаков на начальных этапах развития. Корни получали достаточно влаги, сконцентрированной в верхнем слое почвы, поэтому их длина не превышала 4-6см.

В случае двойных прослоев торфа в сочетании со щебнистым экраном (вариант№8) прирост сухой фитомассы относительно контроля достиг 2,7 раза, а влажной – 3,4 раз. Значения фитомассы превышали 30 ц/га и 40 т/га, соответственно, для сухого и сырого состояния. При этом длина корней не была больше 5 см, а это означает, что питание растений базировалось лишь на верхнем слое торфа. Возможно со временем с развитием газона корни проникнут глубже, достигнув резервного депо влаги и питательных элементов в конструкции, но за небольшой период эксперимента этого не произошло.

Наилучший эффект был достигнут на почвенных конструкциях с гидрогелем, где, как мы помним, отмечались и максимальные запасы влаги. В случае слоя гидрогеля в супесчаной почве (вариант№3) сухая фитомасса превышала контроль в 3 раза, а сырая – в 3,5 раза, достигая величин 35 ц/га и 43 т/га, соответственно. Если же гидрогель вносился в почву со щебнистым экраном, продуктивность газона возрастала еще больше. Сухая фитомасса здесь характеризовалась максимальной величиной 52 ц/га (в 4,5 раза выше чем на контроле), причем 70% от нее составлял травостой. Масса и длина корней, несмотря на относительно малую долю от общей продукции на данной площадке были также рекордно высокими, достигая 15 ц/га и 14 см, соответственно. Это указывало на освоение корнями значительно большего пространства в почве, по сравнению с большинством других вариантов почвенных конструкций. Наряду с водным фактором в виде максимальных запасов влаги, варианты с гидрогелем могли иметь дополнительную стимуляцию роста газонной растительности благодаря высвобождению в почвенный раствор части азота полиакриламида и полиакрилонитрила при их биодеструкции. По-видимому, именно этим можно объяснить насыщенный изумрудный цвет газона на участках с гидрогелем, по сравнению со всеми другими вариантами (фото 16, 17

Приложения). Заметим, что аналогичный результат в виде увеличения концентрации пигмента хлорофилла под действием полиакриламидного гидрогеля был получен нами ранее в аридных климатических условиях (фото 14, табл. 8.1).

Анализируя цветные иллюстрации 16, 17, можно подтвердить визуально рассмотренные выше ***количественные закономерности роста и развития газона*** на разных вариантах почвенных конструкциях. Контрольная площадка резко выделялась среди остальных по наиболее неприглядному внешнему виду газона. Растения имели желтовато-зеленый цвет, были низкорослыми и не образовывали сплошного проективного покрытия площадки. Вероятно, помимо недостатка влаги здесь могли сказываться негативные агрохимические факторы в виде лимита питательных элементов самого верхнего 1-3 см слоя, где произошло укоренение. В конструкциях с торфом, гидрогелем и гидрофобизатором дополнительным источником питательных веществ могли служить сами почвомодификаторы, в состав которых входил азот (СПГ, торф), калий (гидрофобизатор, торф) и иные биофильные элементы. Кроме того, в почвенных конструкциях корни осваивали больший объем почвы, на что указывает их длина от 5 до 14 см, что также способствовало поступлению в них дополнительных количеств питательных веществ. Мощное освоение корневыми системами почвенной толщи с модификаторами-биополимерами и питание за счет их резерва подтверждается также фото 17 (нижний ряд), на которой видно насколько тесно корни сцеплены с гидрогелем и торфом. В целом, дифференцированный анализ биометрических показателей, внешнего вида и фитомассы газонов подтверждает явное преимущество развиваемой технологии почвенного конструирования для озеленения городских территорий, по сравнению с традиционными методами.

Еще одним важным достоинством конструкций является возможность управления их ***солевым режимом*** и предотвращения аккумуляции ***вредных водорастворимых веществ*** в корнеобитаемой зоне. Опыты с динамикой концентрации растворимых поллютантов, проведенные с использованием техники съемных монолитов наглядно иллюстрируют это положение (рис. 8.20-8.21). Как видно из

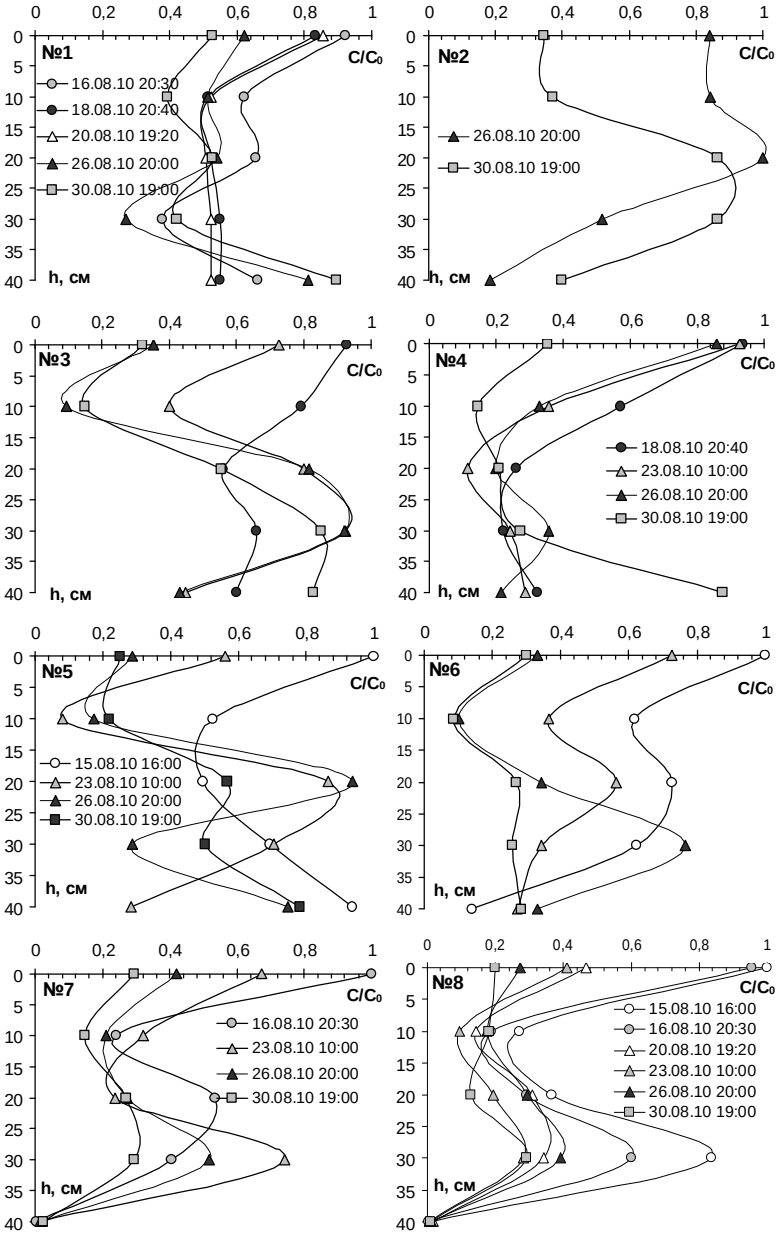


Рис. 4.22. Динамика относительной концентрации загрязняющего электролита (оценка по электропроводности).

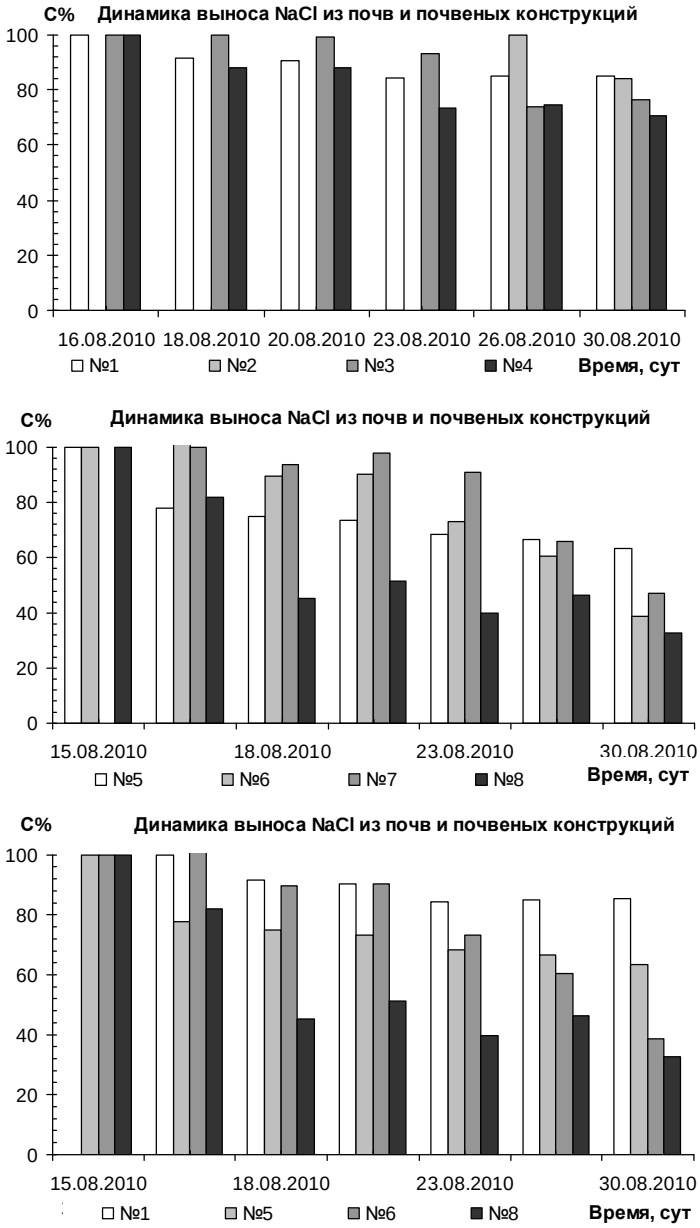


Рис. 8.21. Динамика выноса загрязняющего водорастворимого вещества-электролита из почв и почвенных конструкций

рисунков, в случае контроля водорастворимый загрязнитель вначале вымывался из поверхностного слоя в нижние горизонты, но потом перераспределялся возвратными капиллярными токами так, что значительная его доля (до 40-60 % от исходной концентрации) опять сосредотачивалась в корневой зоне 0-20см). У поверхности, где происходит начальное развитие растений из семян, относительная концентрация поллютанта составила к концу эксперимента 0,53 C/C_0, то есть более половины исходного содержания внесенного загрязнителя. В слоистых конструкциях без грубодисперсного экрана (варианты 2-4) за время эксперимента удалось очистить верхнюю толщу от загрязнения электролитом, снизив показатель $C/C_0 \approx$ до 0,3-0,4. При наличии экрана из щебня эта величина была стабильно ниже и не превышала 0,2-0,3. Поскольку исходная электропроводность, отражающая концентрацию вредного вещества варьировала от 6 до 7 дСм/м , значения 0,2-0,3 единицы соответствовали уровню 1,2-1,5 дСм/м, то есть нормативно чистой почве. Вынос осуществлялся постепенно с задержками в слоях с повышенной влагоемкостью и обменной способностью (см. характерные пики концентраций на рис. 8.20), но к концу эксперимента в конструкциях с противосолевыми защитными экранами и на глубинах концентрация загрязнителя не превышала нормативно допустимых значений.

Нагляднее всего картину общего выноса ***водорастворимого загрязнителя*** отражает ***динамика его запаса*** в толще почвы и соответствующих конструкций (рис. 8.21). Как видно из диаграмм, в случае контрольной почвы и вариантов конструкций без противосолевого экрана (№№ 1-4) за время эксперимента порядка половины месяца из почвенного слоя 50см мощности удалилось лишь 10-30% от исходного количества загрязнителя. Вариант с гидрофобизатором здесь не следует рассматривать, поскольку из-за его внесения в почве так сильно снизился коэффициент фильтрации, что слой солевого раствора, который должен был поступить в почву для имитации ее загрязнения здесь в течение 10 дней держался над поверхностью, и динамику рассоления за счет последующих осадков удалось проследить только в течение последних 5 суток.

Варианты слоистых конструкций со щебнистым экраном (№№ 6-8) оказались наиболее эффективными в борьбе с загрязнением корнеобитаемой толщи водорастворимыми поллютантами (рис. 4.23). Как видно здесь суммарный уровень загрязнителя снизился в 2-3 раза и по прошествии 15 суток эксперимента в почвенной толще, отсеченной экраном осталось на более 30-40% исходного количества поллютанта. Лучшие результаты были у конструкций со слоями торфа (№№7,8), несколько хуже – в варианте с гидрогелем (№6). Просто конструкция со щебнем (№5), в которой не было никаких водоудерживающих и поглощающих компонентов, вопреки ожиданиям оказалась загрязненной в наибольшей степени в рассматриваемой серии вариантов. Остаточный уровень водорастворимого загрязнителя здесь к концу эксперимента превысил 60% от исходного. Объяснение этому, казалось бы парадоксальному результату, на наш взгляд может быть следующим. В этой конструкции, кроме щебня не было никаких иных преград восходящему току растворенных веществ к испаряющей поверхности. Поэтому подвешенная над экраном влага (солевой раствор) в промежутках между дождями имела возможность беспрепятственно подниматься вверх, приводя при испарении к выпадению в осадок и концентрации солей в верхней почвенной толще. Конечно, со временем, осадки вымыли бы водорастворимый поллютант за пределы экрана, и корнеобитаемый слой полностью бы очистился. Однако за период эксперимента этого не произошло, по причине его краткости и невысокой интенсивности дождей.

В случае конструкций с контрастными по капиллярным свойствам слоями в виде торфа солевой раствор, «зависший» над экраном, не мог подниматься вверх из-за разрушения капиллярной сплошности торфяной преградой, и при поступлении осадков быстро вымывался за пределы экрана. Вариант с гидрогелем, занимал промежуточное положение, поскольку из-за неравномерности смешивания с вмещающим материалом, здесь могли образовываться отдельные влагопроводящие пути, по которым часть солевого раствора беспрепятственно возвращалась в поверхностный слой при физическом испарении почвенной влаги.

В целом, эксперимент показал значительные преимущества слоистых конструкций с грубодисперсными экранами в сравнении с контролем и другими вариантами, что дает основание рекомендовать эти типы конструкций для выращивания зеленых насаждений на территориях мегаполиса с повышенной антропогенной и техногенной нагрузкой в виде поверхностного загрязнения (засоления) водорастворимыми поллютантами.

Завершая данный раздел, обратимся к результатам количественной ***оценки почвенного дыхания*** (эмиссии CO_2), отражающего интенсивность функционирования почв и конструктоземов, как живых биокосных систем (рис. 8.22-8.24). Мониторинг почвенного дыхания выявил значительное варьирование этого показателя в течение основного срока эксперимента (июль-август 2010) и последующих дополнительных измерений (сентябрь). В экстремальный период летней жары дыхание на площадках с влагозарядковыми поливами поднималось до очень больших значений потоков CO_2 порядка 2000-3000 мг/$м_2$/час вплоть до 6000 мг/$м_2$/час! Такие величины дыхания можно встретить скорее в условиях влажного и теплого муссонного климата субтропиков и тропиков, а не в южнотаежной зоне умеренного пояса к которой относится природа столицы и Подмосковья. Можно предположить, что наряду с оптимальными гидротермическими параметрами подобное дыхание стимулировали органические компоненты почвомодификаторов, использующихся в конструктоземе (СПГ, торф), поскольку именно на вариантах с подобными веществами отмечались наиболее сильные всплески дыхания, достигавшие 2000-6000 мг/$м_2$/час за период с конца июля по первую декаду августа (рис. 8.22). Заметим, что на контроле эмиссия CO_2 в это время не превышала типичных для зональных дерново-подзолистых почв величин в летний период порядка 300-600 мг/$м^2$/час, несмотря на такое же увлажнение. Фоновый участок пол луговой растительностью (№9) вплоть до начала первых дождей в августе характеризовался самыми низкими значениями дыхания порядка 100-200 мг/$м^2$/час. Поскольку искусственного орошения для фоновых участков не проводилось, столь сильное снижение дыхания здесь полностью обуславливалось недостатком почвенной влаги.

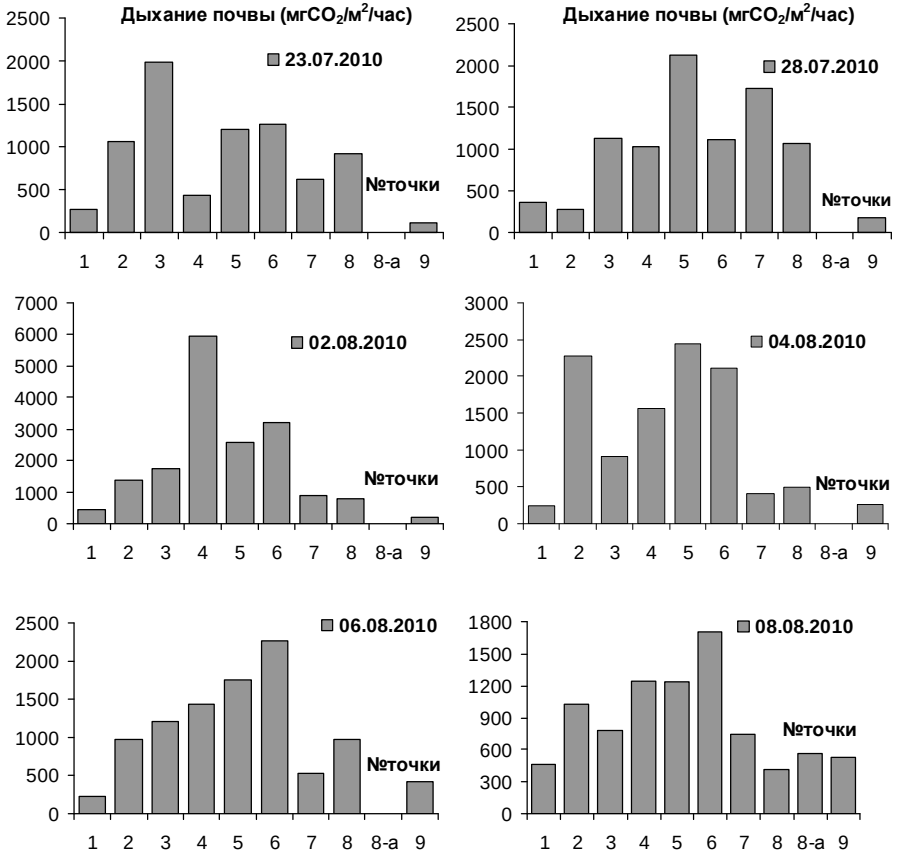


Рис. 8.22. Мониторинг почвенного дыхания на площадках основного объекта с 23.07 по 08.08.2010 (обознач. см. рис. 8.16).

Непостоянство показателя дыхания для исследуемых площадок, чередование всплесков и падений, свидетельствует о напряженности процессов биологического круговорота в большинстве почвенных конструкций и колебательном режиме их функционирования. По-видимому, здесь сказывались взаимоотношения между почвенными организмами и корневыми системами растущего газона. Биодеструкторная деятельность микроорганизмов способствовала минерализации органических веществ, включая сами почвомодификаторы и высвобождению элементов минерального питания с азотом,

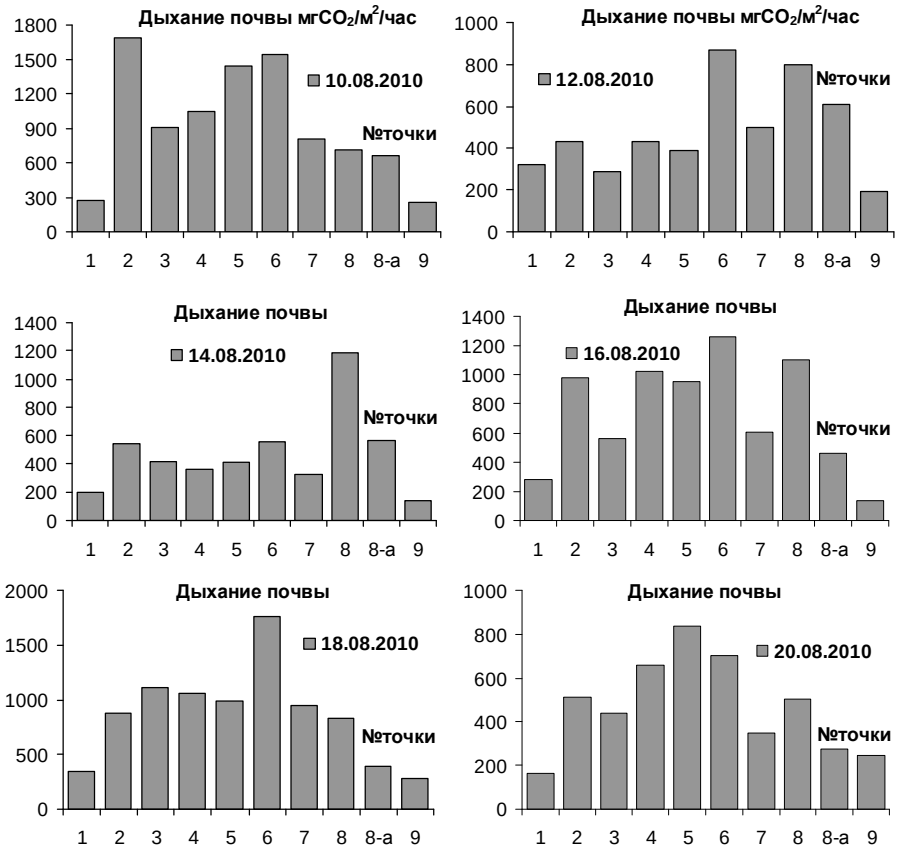


Рис. 8.23. Мониторинг почвенного дыхания на площадках основного объекта с 10.08 по 20.08.2010 (обознач. см. рис. 8.16).

которые поступали в почвенный раствор и поглощались корнями травянистых растений, обеспечивая прирост их фитомассы и фотосинтез. В свою очередь свежеобразованные органические вещества в виде корневых экссудатов поступали в ризосферу, стимулируя рост микроорганизмов и их деструкторную функцию. Лимит вещества в этом цикле приводил ко временным задержкам функционирования и спаду дыхания. Всплески дыхания на фоне постоянных и оптимальных гидротермических показателей, по-видимому,

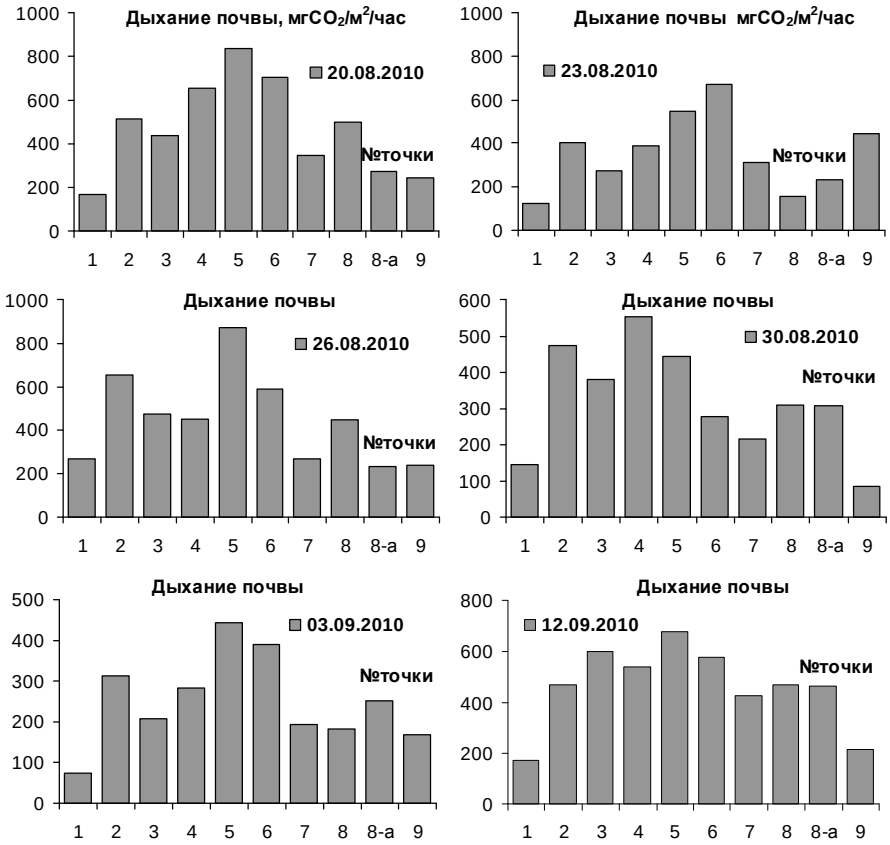


Рис. 8.24. Мониторинг почвенного дыхания на площадках основного объекта с 20.08 по 12.09.2010 (обознач. см. рис. 8.16).

отражали высвобождение элементов питания при минерализации органических веществ (стимуляция корневого дыхания) или поступление экссудатов в ризосферу (питание и дыхание микроорганизмов). Отметим, что замеры дыхания производились практически в одни и те же часы вечером (19-20^{00}), что исключало влияние фактора суточного варьирования.

В августе начались первые дожди, участок был переведен на режим автономного водного питания без дополнительных искусственных поливов, к тому же в 20-х числах наступило резкое похолодание. Все вместе закономерно обеспечило

некоторый спад величин дыхания в период с 10.08 по 20.08.2010 (рис. 8.23), однако на наиболее активных участках объекта оно продолжало быть очень высоким (1000-1800 мг/м^2/час). К таким участкам можно прежде всего отнести вариант №6 конструкции с гидрогелем и щебнем, стабильно демонстрирующий высокие показатели дыхания в 1000-2000 на протяжении основного срока эксперимента (рис. 8.22-8.23). Дыхание на контроле (№1) и фоновом участке (№9) продолжало оставаться самым низким в рассматриваемой серии вариантов почв и конструктоземов. К концу августа фоновый участок, получив, наконец, влагу в виде обильных осадков даже несколько перегнал контрольный по данному показателю, по-видимому, из-за стимуляции роста иа развития микрофлоры и корневых систем. Известно, что длительная засуха, спсособствуя коагуляции почвенных коллоидов, гибели беспозвоночных и микрофлоры и выходу в раствор ранее связанных ими элементов питания, по завершении сменяется резким всплеском вегетации и, соответственно, почвенной активности. Это положение можно наблюдать в настоящий момент в мегаполисе, который буквально расцвел после длительной летней паузы в вегетации. Таким образом, рост дыхания на фоновом участке по сравнению с контролем можно объяснить подобными эффектами.

На большинстве остальных площадок с почвенными конструкциями в рассматриваемый августовский период наблюдался значительно более высокий уровень дыхания (500-1000 мг/м^2/час). При этом пространственное варьирование дыхания на одном и том же участке (точка 8 и 8-а) могло быть весьма значительным (различия в 1,5-2раза), и даже перекрывать различия между отдельными видами некоторых сравниваемых конструкций (например, №№ 7 и 8). Ситуация, когда доза (количество слоев) органогенного почвомодификатора, потенциально доступного для биодеструкции, практически не влияет на дыхание становится вполне понятной, если учесть закономерности профильного распределения интенсивности биодеструкции (минерализации) в почвах (см. главы 1, 5, рис. 1.14). Для рассматриваемого класса почв 80-90% интенсивности приходится на верхние 10-15 см, значит «погребенные» на больших глубинах органогенные

слои почти не участвуют в этом процессе, оставаясь устойчивыми к минерализации (рис. 1,4, 5.14).

Заключительный этап наблюдений пришелся на конец августа- середину сентября, когда вместо экстремальной жары и засухи установилась обычная для средней полосы осенняя погода с частыми ливневыми осадками и относительно невысокими температурами. В результате дыхание почв и конструктоземов снизилось до нормальных величин порядка 400-600 мг/м^2/час. Вместе с тем и на этом фоне проявились те же отличия в функционировании почв и почвенных конструкций, что и ранее (рис. 8.24). Наиболее влагоемкие и продуктивные варианты конструктоземов с гидрогелем, торфом и грубодисперсным экраном стабильно демонстрировали наивысшую биологическую активность, в то время как контрольная дерново-(урбо)подзолистая почва с минимальной продуктивностью газона отличалась самыми низкими показателями дыхания в течение всего эксперимента.

Такая ситуация отражает естественную тесную связь продукционного процесса (фотосинтеза) с обратной составляющей круговорота – биодеструкцией и минерализацией органических веществ, происходящих в почвах. Это значит, что почвенные конструкции с зелеными нгасаждениями функционируют нормально, в максимальной степени приближенно к природным аналогам, и не требуют на данном этапе дополнительного вмешательства человека с внесением минеральных удобрений.

8.4. Дополнительные эксперименты на различных тестовых площадках г. Москвы.

В заключительной части главы дадим краткий анализ результатам экспериментальных исследований на дополнительных объектах. Они лишь подтвердили полученные ранее данные о преимуществах технологии почвенного конструирования для озеленения городских территорий с повышенной антропогенной нагрузкой в экстремальных погодных условиях. К тому же были выявлены значительные возможности почвенного конструирования в регуляции газовой функции городских почв и, в частности, – поглощения угарного.

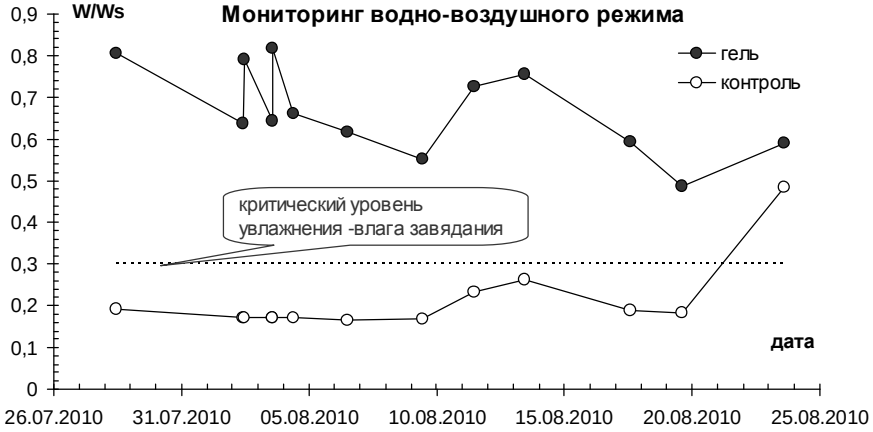


Рис. 8.25. Мониторинговые исследования водно-воздушного режима на площадках вдоль Мичуринского проспекта (дополнительные эксперименты). **Аналитик Башина А.С.**

газа, чья концентрация в мегаполисе во время подмосковных пожаров повсеместно достигла рекордно-высоких величин в 3-5 раз превышающих ПДК

На рисунке 8.25 приведены выборочные результаты мониторинговых наблюдений за водно-воздушным режимом верхнего корнеобитаемого слоя контрольной почвы и почвенной конструкции со слоем гидрогеля на ее основе на опытных площадках вдоль Мичуринского проспекта. Как видно и здесь внесение гидрогеля способствовало значительной оптимизации водоудерживающей способности почвы по сравнению с контролем, где в период летней засухи корнеобитаемый слой пересох до критической влажности завядания устойчивого растений, при которой рост был невозможен. Лишь в последней декаде августа с наступлением дождливой погоды этот горизонт увлажнился до приемлемых значений. На площадке с гидрогелем влажность держалась устойчиво в пределах оптимальных для растительности значений для класса суглинистых почв (показатель $0,3<W/Ws<0,85$), обеспечивая необходимое водопотребление. Делянки с газоном регулярно увлажнялись поливом 5мм/сутки, однако водоудерживающей способности необработанного

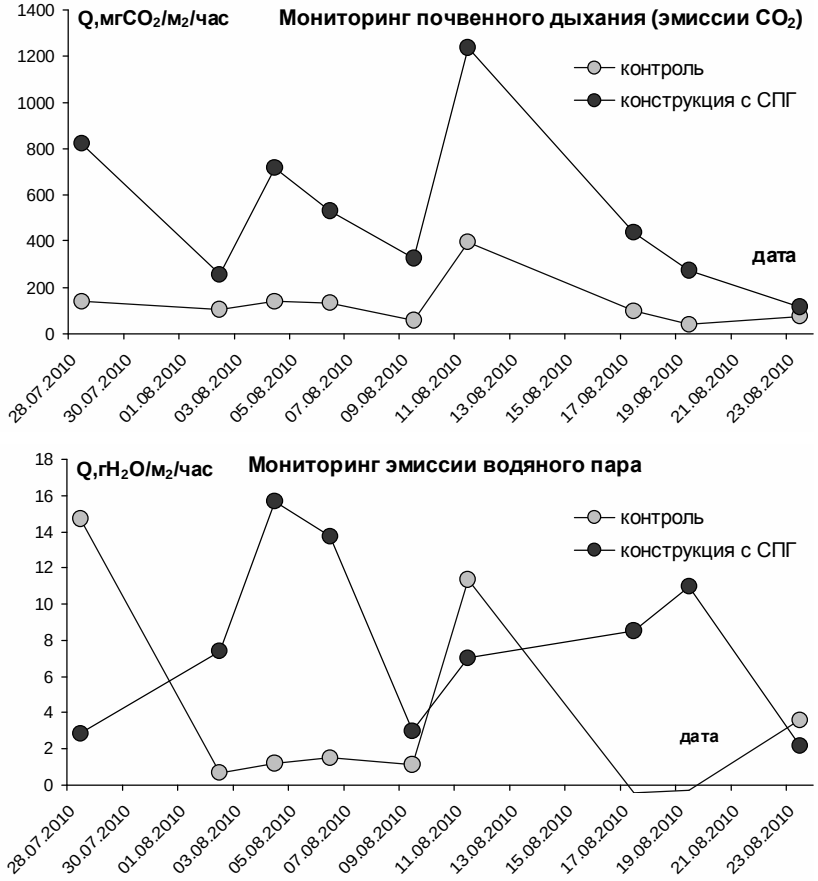


Рис. 8.26. Мониторинговые исследования почвенного дыхания и испарения влаги на площадках вдоль Мичуринского проспекта (дополнительные эксперименты). **Аналитик Башина А.С.**

почвогрунта с сильным капиллярным эффектом не хватало для обеспечения потребностей растущего газона, у которого, согласно рис. 4.34, (см. главу 4) транспирационный расход в самое жаркое время опыта мог даже превышать величину поступления влаги в 5мм. Гидрогель способствовал сосредоточению влаги в корнеобитаемом слое с минимальными непродуктивными потерями на испарение и отток внутрь почвы. Поэтому продуктивность газона была на таких площадках

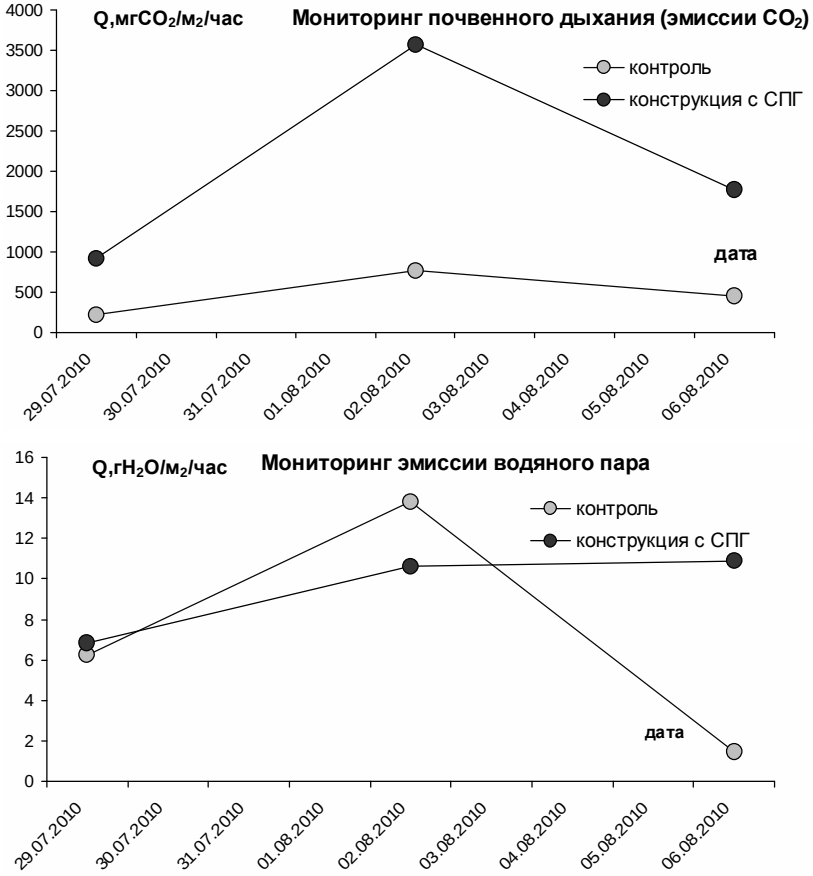


Рис. 8.27. Мониторинговые исследования почвенного дыхания и испарения влаги на площадках вдоль Красностуденческого проезда (дополнительные эксперименты). **Аналитик Башина А.С.**

максимальной и минимум в 1,5 раза превышала таковую на контроле.

Помимо обеспечения продуктивности газона (фотосинтеза) конструкции с гидрогелем оптимизировали дыхание почвы, то есть обратную биодеструкторную функцию, необходимую для устойчивого биологического круговорота на данной территории (рис. 8.26-8.28). Мониторинг почвенного дыхания, производимый на дополнительных городских

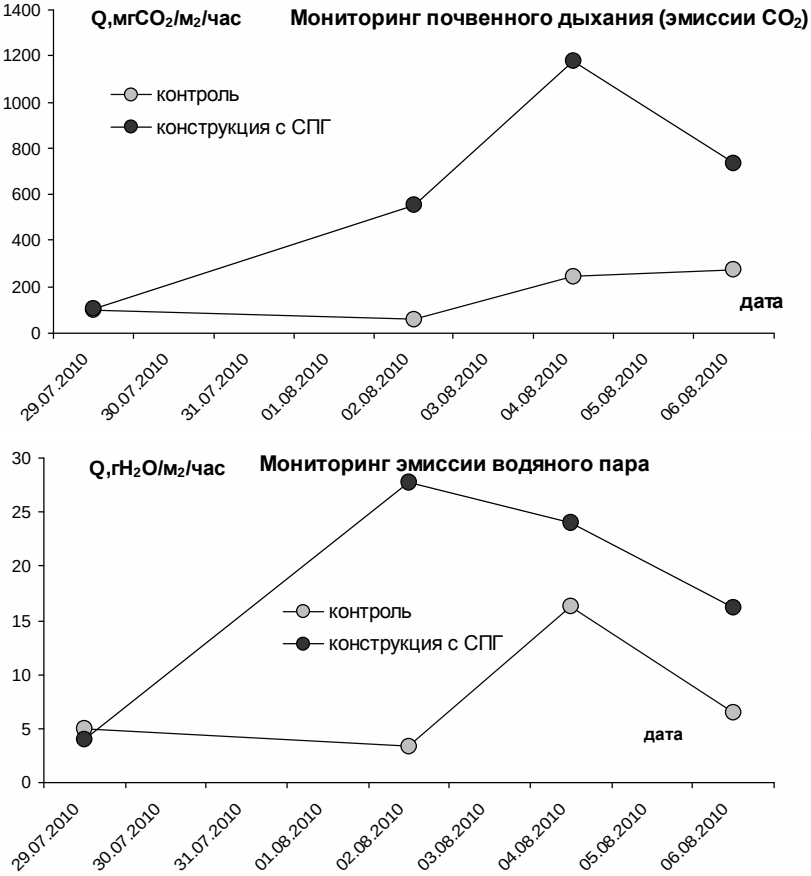


Рис. 8.28. Мониторинговые исследования почвенного дыхания и испарения влаги на площадках вдоль Тимирязевской улицы (дополнительные эксперименты). **Аналитик Башина А.С.**

площадках в разных районах мегаполиса повсеместно выявил более высокий (в 2-5 (6) раз) уровень биологической активности (эмиссии CO_2) в конструкциях с гидрогелем по сравнению с контрольными (фоновыми) участками, причем как сухими, так и увлажняемыми по той же схеме полива, что и для конструктозема. Общие величины дыхания на участках с гидрогелем варьировали в среднем от 600 до 1000 мг/м^2/час, указывая на высокую биологическую активность, а в отдельные

моменты достигали 1500 и даже 3500 мг/м^2/час! На контрольных площадках максимальный уровень дыхания не превышал 400-700 мг/м^2/час, а в среднем был равен 100-400 мг/м^2/час, что указывало на низкую биологическую активность.

Эмиссия водяного пара не была подвержена каким либо постоянным закономерностям и зависела главным образом от наличия в почве влаги (рис. 8.26-8.28). Поэтому часто варианты с гидрогелем, где производились регулярные поливы, демонстрировали более высокие значения испарения на фоне пересушенной почвы контроля. Там же где контрольные участки поливались или попадали под увлажнение дождевыми осадками потоки водяного пара могли быть даже выше чем в конструктоземах с гидрогелем, по причине его большей водоудерживающей способности.

Конструктоземы с гидрогелем характеризовались также повышенной способностью к поглощению угарного газа (рис. 8.29). Наши предварительные исследования по этой проблеме выявили возможность значительного усиления газовой функции городских почв с помощью органогенного почвомодификатора AridGrow, 5% доза которого в песке позволяла вывести уровень поглощения на отметки, характерные для черноземов [Смагин, 2009, Смагин и др., 2008]. Однако эти работы производились с образцами почв в лабораторных условиях. В исследовании по Госконтракту № 8/3-66н-10 были осуществлены непосредственные полевые эксперименты. Как видно из их результатов конструкции с гидрогелем способствовали увеличению поглощения CO в среднем в 2 раза. В отдельных случаях, приходящихся на моменты пика задымления городской атмосферы угарным газом от подмосковных пожаров (1 декада августа) в контрольной почве было отмечено падение этой функции, а в конструктоземе сохранялся высокий уровень поглощения (в 12 раз выше чем на контроле!). Механизм стимулирования газовой функции вполне понятен, поскольку поглощение CO осуществляется в почве особой группой карбоксидобактерий, а значит, общее увеличение биологической активности при оптимизации водно-воздушного режима на фоне высоких температур будет улучшать и эту частную функцию почвенной биоты.

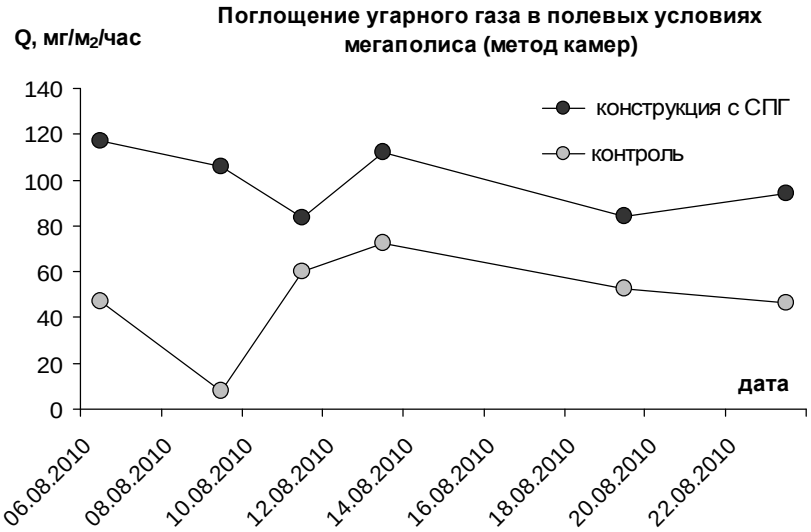


Рис. 8.29. Мониторинговые исследования поглощения окиси углерода на площадках вдоль Мичуринского проспекта (дополнительные эксперименты).

Интересные и перспективные варианты почвенных конструкций с щебнистым покрытием поверхности подробно не рассматриваются в данной монографии, так как они не входили в непосредственную задачу НИОКР Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10а. Кратко характеризуя результаты этих инициативных экспериментов отметим, что в них получено сокращение под слоем щебня в 5-10 см на 60-85% испарения, в 4-11 раз эмиссии диоксида углерода и увеличение на 80-100% запасов влаги. На рис. 8.30 приведены выборочные данные одного из таких экспериментов с оценкой эмиссионных потоков CO_2 и паров воды поверхностью дерново-(урбо)подзолистой средне-суглинистой почвы в зависимости от экранирующего слоя щебня. В верхней части рисунка содержатся данные по потокам диоксида углерода, а в нижней – по величинам удельных потоков CO_2 и H_2O, нормированных максимальными значениями, соответствующими эмиссии с не экранированной поверхности (индекс Q/Q_{max}). В наибольшей степени экранирование способствовало уменьшению потоков диоксида

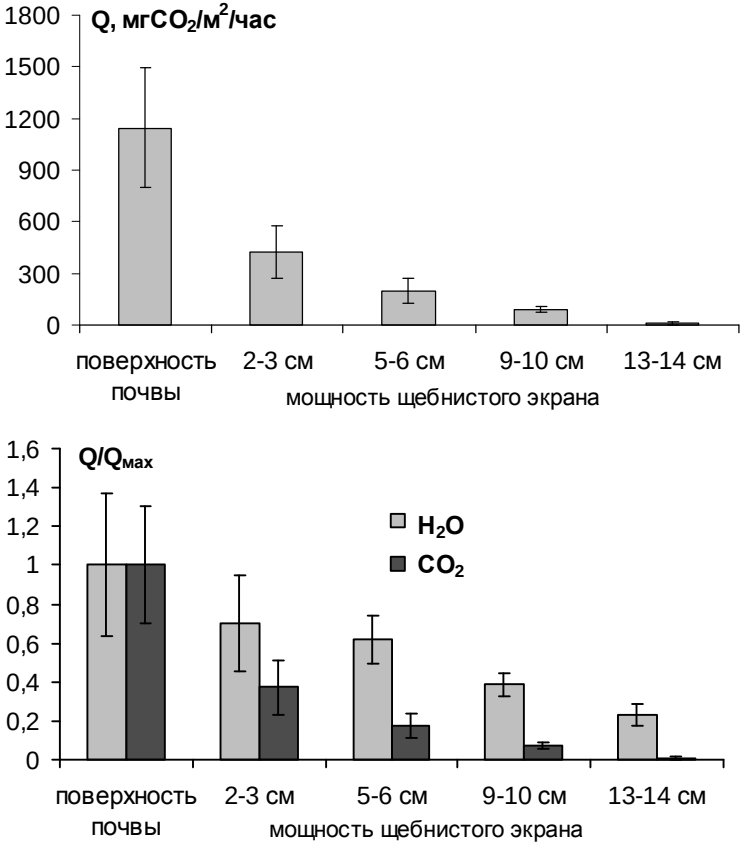


Рис. 8.30. Экспериментальные исследования влияния щебнистых экранов на эмиссию газообразных веществ поверхностью почвы.

углерода. Испарение на этом фоне сокращалось не так сильно. Вероятно это связано с различиями в источниках газообразных веществ и механизмах их перемещения. Для CO_2 основной источник – биогенный и, возможно удалении от поверхности (экранирование) сильнее сокращает его интенсивность, согласно рассмотренным выше закономерностям (глава 1, 5). Доминирующий механизм перемещения – изотермическая диффузия, для которой поток пропорционален градиенту

концентрации и, соответственно, обратно пропорционален расстоянию до границы с атмосферой (резервуаром низкой концентрации CO_2) [Смагин, 2005]. Испарение с поверхности почвы – напротив, чисто физический процесс и на источник (переход части жидкой фазы почвы в пар) экран действовать не должен. Основной механизм, ответственный за стадию быстрого испарения – капиллярное поднятие и здесь как раз экранирование (мульчирование) поверхности некапиллярным материалом будет действенным способом снижения испарения. Однако в пароперенос изотермическая диффузия играет второстепенную роль и, по-видимому, здесь доминируют конвективные потоки (естественная конвекция при нагреве поверхности и вынужденная при наличии ветра) [Смагин, 2005]. Очевидно экранирование крупнопористым материалом не столь сильно влияет на конвективный массоперенос по сравнению с диффузией, поэтому сокращение испарения выражено не так ярко, как динамика эмиссии CO_2.

В целом, экранирование грубодисперсным материалом достаточно сильно снижает эмиссию газообразных веществ, что позволяет рекомендовать этот технологический прием для оптимизации газовой функции городских почвенных объектов вблизи автомагистралей или при рекультивации земель. Организация на площадках под такими конструкциями локального дренажа с отводом вод в ливневую канализацию на случай сильных осадков и снеготаяния будет блокировать загрязнение почвы, а оставшаяся влага, фильтруясь через почвенную толщу будет способствовать пополнению подземных почвенно-грунтовых вод. Такие конструкции в сочетании с локальным размещением растительности (солитеры, цветники) могут найти широкое применение на участках вдоль магистралей с повышенным техногенным прессом, наряду с рассмотренными выше вариантами конструктоземов с грубодисперсными противосолевыми экранами.

Результаты экспериментальных работ по тестированию конструкций, наряду с научными принципами их проектирования с использованием современных моделей составляют основу ***технологического регламента*** данной инновационной разработки, проектный вариант которого будет приведен в заключительной главе монографии

ГЛАВА 9. Проект регламента инновационных технологий почвенного конструирования для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой (для условий г. Москвы).

1. ВВЕДЕНИЕ.

Почвенное конструирование является новым направлением в урбоэкологии и ландшафтной архитектуре, позволяющим с помощью инженерного расчета создавать оптимальные по своим характеристикам плодородные почвы (конструктоземы) на базе имеющихся почвенных ресурсов и натуральных или синтетических материалов – почвенных кондиционеров. Наиболее продуктивный путь почвенного конструирования заключается в слоистом способе закладки материалов, имитирующем реально существующий в природе процесс вертикальной дифференциации почв на отдельные слои-горизонты, различающиеся по своим функциональным качествам. Основным элементом конструкции является так называемый «рабочий слой». В нем сосредотачиваются корневые системы растений, и из него осуществляется основное потребление элементов питания и влаги. Для формирования рабочего слоя используются природные или синтетические биополимеры, добавление которых к исходному грунту увеличивает его водоудерживающую и поглотительную способность, актуальное плодородие в виде запаса продуктивной влаги и доступных питательных веществ, оптимизирует структуру, тепловые, технологические и иные характеристики почвы. В современной практике с этой целью чаще всего используются органические удобрения, компосты, торф, гумусовые препараты, а из синтетических средств – ионообменные смолы и сильнонабухающие полимерные гидрогели. Мощность плодородного слоя, глубина заделки почвенных кондиционеров, а также количество слоев конструкции рассчитываются в зависимости от специфики объекта (гранулометрического состава, показателей плодородия, водно-физических свойств почв, материнских и подстилающих пород, положения уровня грунтовых вод и т.д.), типа и потребностей растительных культур, а также качества и стойкости органических материалов-почвомодификаторов.

Поскольку интенсивность биодеструкции органических веществ снижается с глубиной почвы, в большинстве типов конструкций почвомодификаторы рекомендуется располагать на некотором удалении от поверхности. Часто в конструкциях формируется не один плодородный слой, а несколько, чтобы растения по мере роста и развития корневых систем могли обеспечить свои потребности необходимым количеством элементов питания и влаги.

Не менее существенно и другое свойство слоистых конструкций, а именно – разрыв капиллярной сплошности в почвогрунте. Капиллярный эффект является основным физическим механизмом загрязнения и засоления почв, как повсеместного фактора их деградации и потери качества в условиях мегаполиса. Именно с капиллярным током влаги техногенные поллютанты в виде солевых растворов подтягиваются к поверхности почвы и концентрируются там после испарения влаги. Прослойка из чужеродного материала существенно замедляет такое движение вплоть до полного прекращения в случае использования грубодисперсных материалов, лишенных капиллярности. Поэтому для эффективной борьбы с антропогенным загрязнением и засолением рекомендуются слоистые почвенные конструкции с основанием-экраном из грубодисперсного материала (гравия, щебня, керамзита, грубозернистого песка, т.д.) или с гидрофобными пропитками. Подобный экран, разрушая капиллярную гидравлическую связь, отсекает «рабочий слой» от нижележащего почвогрунта. В результате вымытые за пределы экрана периодическими осадками или поливами водорастворимые поллютанты не имеют возможности вернуться в корнеобитаемую толщу при восходящих к испаряющей поверхности токах влаги. Очищенная таким образом корневая зона удерживает дополнительное количество влаги за счет эффекта «антидренажа» (подвешивания почвенной влаги) от экрана, а также внесения высокодисперсных органических почвомодификаторов природного или синтетического генезиса. Тем самым в почвенных конструкциях удается справиться с основными лимитирующими рост и развитие растений факторами в условиях мегаполиса – загрязнением (засолением) и недостатком продуктивной влаги в засушливое летнее время.

Технология обеспечивает повышение запасов продуктивной влаги, урожайности (продуктивности) зеленых насаждений и общей биологической активности почвенных конструкций в 1,5-2 раза по сравнению с контрольными участками при надежной защите от техногенного загрязнения и вторичного засоления.

Поскольку универсальных типов и параметров почвенных конструкций не существует, в каждом проекте должны учитываться конкретная специфика местности, почвогрунтов, растительных культур, возможности и интересы заказчика, что позволяет найти оптимальное инженерное решение. При этом используются современные математические модели энерго-массобмена в почвах, а также необходимое информационное обеспечение в виде экспериментально определенных гидрофизических свойств и характеристик. Все это характеризует технологию почвенного конструирования как инновационную и наукоемкую, базирующуюся на современных знаниях о почвенных факторах роста и развития зеленых насаждений и их антропогенной динамике в условиях мегаполиса.

Несмотря на успешное развитие технологий почвенного конструирования за рубежом, утвержденные в законодательном порядке нормативные документы и стандарты по ним отсутствуют, что осложняет их применение на практике столичного жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства. На решение данной проблемы направлена настоящая разработка Регламента инновационной технологии почвенного конструирования для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой. При составлении Регламента были использованы следующие документы федерального и муниципального уровней:

-Федеральный закон от 10.01.2002 «**Об охране окружающей среды**» № 7-ФЗ;

-**Земельный кодекс РФ** от 25.10.2001 № 136-ФЗ;

-Приказ МПР-РФ №525 и Роскомзема №67 **«Об утверждении основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы»** от 22 декабря 1995 года, рег. №1136;

-ГОСТ 17.4.3.01-83 **«Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб»**;

-ГОСТ 17.4.4.02-84 **«Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа»** ;

-Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.7.1287-03 **«Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы»** ;

-Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06 **«Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве»** ;

-Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2042-06 **«Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве»**;

-Закон г. Москвы «**О городских почвах**» от 04.07.2007 № 31;

-Закон г. Москвы «**Градостроительный кодекс г. Москвы**» от 25.06. 2008 №28;

-Постановление Правительства Москвы «**Об экологической доктрине города Москвы**» от 04.10.05 № 760-ПП;

-Постановление Правительства Москвы «**О повышении качества почвогрунтов в городе Москве**» от 27.07.2004 № 514-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 09.08.2005 № 594-ПП);

-Постановление Правительства Москвы «**Об утверждении норм и правил проектирования комплексного благоустройства на территории г. Москвы; МГСН 1.02-02»** 06.08. 2002 г. № 623-ПП;

-Постановление Правительства Москвы **«Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы»** от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП).

-**Экологические требования к орошению почв России**. РАСХН, 1996.

1.1. Некоторые понятия и термины:

Горизонт почвы (почвенной конструкции) – относительно однородный элемент вертикальной структуры почвы (почвенной конструкции) обладающий характерными размерами (мощностью), составом, генезисом, свойствами и

выполняющий определенную почвенно-экологиченскую функцию (комплекс функций);

Городские почвы – покрывающие территорию города естественные, измененные, а также искусственно созданные почвы мощностью до 1 м;

Гранулометрический состав – характеристика дисперсности почв и грунтов в виде массовой доли (процентного содержания) почвенных частиц того или иного размера; подразделяется на общие категории: «песчаный», «супесчаный», «суглинистый», «глинистый» и т.д.;

Запасы веществ (влаги) в почве – интегральная ресурсная характеристика общего количества веществ (влаги), сосредоточенных в слое почвы известной мощности на единице площади земельного участка; определяются интегрированием по вертикальной координате (глубине почвы) произведения массовой доли вещества (влажности) на плотность почвы;

Коэффициент фильтрации – физическая величина, характеризующая максимально возможную скорость движения (фильтрации) влаги в почвах, грунтах и иных пористых объектах; определяется экспериментально в полевых условиях или в лаборатории на образцах почвогрунтов ненарушенного сложения принятыми в гидрофизике и мелиорации почв методами;

Основная гидрофизическая характеристика почвы – зависимость между энергией (термодинамическим потенциалом) и содержанием влаги (влажностью) в почве; определяется специальными методами гидрофизики почв (тензиометрия, центрифугирование, метод мембранного пресса) в лабораторных условиях;

Плотность почвы – отношение массы высушенной в стандартных условиях почвы к ее объему; определяется в полевых условиях стандартным буровым методом;

Почвы – самостоятельное естественно-историческое органоминеральное природное тело, возникшее на поверхности земли в результате длительного воздействия биотических, абиотических и антропогенных факторов, состоящее из твердых минеральных и органических частиц, воды и воздуха и имеющее специфические генетико-морфологические признаки, свойства,

создающие для роста и развития растений соответствующие условия;

Почвенные конструкции (конструктоземы) – целенаправленно возводимые человеком с помощью ручного труда и техники на основе природных и синтетических материалов почвоподобные объекты, способные эффективно поддерживать рост и развитие зеленых насаждений и выполнять иные экологические функции, присущие почвенным объектам;

Почвенные материалы – естественные и синтетические компоненты почвогрунтов, использующиеся в конструировании: растительные грунты (гумусовые горизонты); рыхлые горные породы (супеси, пески, суглинки, глины), добываемые в карьерах и изымаемые при строительстве различных сооружений; различные виды торфа (верховой, переходный, низинный), сапропель, компосты, синтетические гидрогели, геосинтетика, биотекстиль и т.д.;

Почвенные кондиционеры (почвомодификаторы) – почвенные материалы, вносимые с целью оптимизации водоудерживающей и поглотительной (обменной) способностей почвы, ее структурного состояния и иных почвенно-экологических факторов;

Почвенные режимы – закономерно повторяющиеся изменения мобильных свойств и характеристик почвы (температуры, влажности, состава и концентраций почвенных растворов, микробиологической активности (дыхания) и т.д.) от которых зависит текущее выполнение экологических функций, включая поддержание роста и развития зеленых насаждений;

Почвенные ресурсы – сосредоточенные на территории земельного участка запасы почвогрунтов в пределах расчетной толщи (1м, согласно закона г. Москвы «О городских почвах») и содержащихся в них веществ, прямо или косвенно влияющих на выполнение почвами их экологических функций, включая плодородие;

Рекультивация земель – комплекс мероприятий, направленных на восстановление продуктивности нарушенных земель, а также на улучшение условий окружающей среды;

Транспирационный расход – интенсивность потребления влаги растениями из почвы в процессе их роста,

развития, поддержания продукционного процесса и жизнедеятельности;

Транспирационный коэффициент – отношение количеств (запасов) влаги, потребленных растениями из почвы к величине произведенной при этом растительной продукции на единице площади земельного участка;

Энергия водоудерживания (термодинамический потенциал почвенной влаги) – работа, которую надо затратить, чтобы извлечь из почвы определенный объем (массу) влаги;

Экологические функции почв – комплекс факторов и воздействий со стороны почвенных объектов на окружающую среду с целью жизнеобеспечения, ремедиации и эволюции (плодородие, очищение атмосферы, вод, закрепление земной поверхности, депонирование биофильных элементов и их соединений, банк биоинформации, поддержание биоразнообразия и т.д.).

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

2.1. Почвенные конструкции – искусственно создаваемые инженерные сооружения в виде системы функциональных горизонтов (слоев), коммуникаций, барьеров и иных структурных элементов с целью оптимизации почвенных свойств, режимов и экологических функций в антропогенных ландшафтах. Различают следующие основные типы конструкций: земледельческие искусственно создаваемые почвы; локальные и сплошные почвенные конструкции для озеленения, благоустройства и рекультивации земель; почвенные конструкции плоскостных спортивно-игровых сооружений; инженерно-технические геостабилизационные конструкции; инженерно-технические почвенно-мелиоративные конструкции.

2.2. Городские почвенные конструкции для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой предназначаются для поддержания устойчивого роста и развития зеленых насаждений, обеспечения их потребностей в пространстве, влаге, воздухе, элементах питания и иных экологических факторах при защите корнеобитаемого слоя от

загрязнения и засоления водорастворимыми формами техногенных поллютантов. Их реализация в условиях мегаполиса соответствует современным требованиям устойчивого развития и качества жизненно-важных компонентов городской среды, закрепленных в экологической доктрине г. Москвы и Законе г. Москвы «О городских почвах».

2.3. В составе типовых конструкций для городского озеленения и благоустройства выделяется рабочая (корнеобитаемая) зона, где сосредотачивается влага и необходимые растениям элементы питания, и защитные экраны (барьеры), отделяющие эту зону от загрязненной почвенно-грунтовой толщи и других потенциальных источников загрязнения (засоления) вредными веществами.

2.4. Для формирования рабочей аккумулятивной зоны почвенных конструкций используются природные минеральные почвогрунты, заводские растительные почвогрунты (почвенные смеси) и высокодисперсные органические почвомодификаторы на основе природных (торф, сапропель, компосты, гуматы) и синтетических (гидрогели, структоры, ионообменные смолы, ПАВ) веществ. Защитные экраны выполняются из лишенного капиллярных свойств грубодисперсного материала (щебень, галька, гравий, керамзит) или при помощи гидрофобизации исходных почвогрунтов.

2.5. Набор и размеры (мощности) функциональных слоев почвенной конструкции, глубина их заделки, а также количества использующихся при этом почвенных материалов определяются индивидуальным проектом конструкции с применением современных моделей энергомассообмена в системе «почва-растение-атмосфера» с учетом почвенно-экологической специфики территории и потребностей выбранных для озеленения растительных культур.

2.6. Проект почвенной конструкции включается в состав разработанной специализированными организациями проектной документации на данную территорию, согласованной и утвержденной в установленном порядке в соответствии с Правилами создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП), Нормами и

Правилами проектирования комплексного благоустройства на территории г. Москвы (МГСН 1.02-02) от 06.08. 2002 г. № 623-ПП, а также Основными положениями о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы, утвержденными Приказом МПР-РФ №525 и Роскомзема №67 от 22.12.1995 г.

3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЧВЕННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ.

3.1.Областью применения технологии почвенного конструирования является широкий спектр городских территорий с высокой антропогенной нагрузкой, предназначенных для озеленения, комплексного благоустройства и рекультивации.

3.2. В соответствии с Градостроительным кодексом г. Москвы от 25.06. 2008 №28 эти территории могут принадлежать к следующим типам функционального использования, назначения: общественно-деловым (Б), жилым (В), производственным (Г), а также их смешанным комбинациям. Природные зоны с естественным почвенным покровом в данный перечень не включаются.

3.3. Согласно действующим Правилам создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП) территории, на которых могут быть созданы конструктоземы относятся к следующим категориям озелененных территорий:

- общего пользования (подгруппа искусственно созданных территорий);
- ограниченного пользования (подгруппы территорий промышленных предприятий, спортивных комплексов, жилых кварталов);
- специального назначения (подгруппы территории вдоль автомобильных и железных дорог, санитарно-защитных, защитно-мелиоративных и иных зон).

3.4. Почвенные конструкции могут создаваться на указанных территориях в случаях нового строительства, реконструкции, капитального ремонта объектов озеленения и

элементов благоустройства, рекультивации загрязненных земель, а также компенсационного озеленения.

3.5. Сплошные почвенные конструкции предназначены для выращивания травянистых насаждений преимущественно в виде зеленых газонов и цветников. Наиболее целесообразным и эффективным представляется их использование на участках городских территорий, подверженных постоянному антропогенному воздействию в виде загрязнения водорастворимыми формами вредных веществ, включая искусственное засоление противогололедными средствами, поскольку обычные методы озеленения в этих условиях чаще всего не позволяют сформировать устойчивый растительный покров.

3.6. Подобные участки располагаются преимущественно на территориях ограниченного пользования и специального назначения в непосредственной близости от источников загрязнения (засоления). Ими могут быть газоны и цветники вдоль городских автомагистралей, и иных транспортных сооружений (автомобильных стоянок, автозаправочных станций, пунктов ремонта и обслуживания автотехники), тротуаров и пешеходных коммуникаций в селитебной зоне, озеленяемые участки промышленных зон, санитарно-защитных зон предприятий.

3.7.Также перспективным является использование технологии почвенного конструирования на особо ответственных объектах территорий общего и ограниченного пользования, где требуется сформировать устойчивый растительный покров с повышенными эстетическими требованиями. Это могут быть газоны и цветники вокруг городских административных зданий, архитектурных памятников культурного наследия, бизнес-центров, гостинично-ресторанных комплексов, спортивно-развлекательных сооружений, на скверах и площадях центральной части города и т.д. Способность почвенных конструкций аккумулировать дополнительные количества элементов питания и влаги, наряду с защитой от загрязнения, присущего почвогрунтам центральной части города, позволяют в этих условиях поддерживать высокую продуктивность зеленых насаждений, особенно в засушливое время года, когда

на обычных почвогрунтах растения необратимо увядают из-за недостатка влаги и концентрирования токсичных веществ.

3.8. Отдельной областью применения технологии являются городские территории, подлежащие рекультивации земель, нарушенных при складировании и захоронении промышленных, бытовых и других отходов, включая поля аэрации очистных сооружений, при строительстве, эксплуатации и консервации подземных объектов и коммуникаций в соответствии с Основными положениями о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы, утвержденными Приказом МПР-РФ №525 и Роскомзема №67 от 22.12.1995 г., а также при ликвидации последствий загрязнения земель опасной и чрезвычайно опасной категории в соответствии с СанПиН 2.1.7.1287-03. Строительство почвенных конструкций в этом случае проводится на техническом этапе рекультивации и имеет целью восстановления плодородного слоя почвы с защитой от нижележащих загрязненных почвогрунтов и их максимальной изоляцией от пограничных сред и контактов с человеком.

4. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

4.1. Проектирование почвенных конструкций для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой осуществляется специализированными организациями в процессе подготовки технической документации по проектам строительства, комплексного благоустройства и рекультивации земель на основе действующих экологических, санитарно-гигиенических, строительных и других нормативов и стандартов с учетом вида растительности, природно-климатических условий и месторасположения земельного участка.

4.2. Специалисты, осуществляющие проектирование почвенных конструкций должны иметь профессиональную подготовку в области инженерного почвоведения и технологического моделирования по дисциплине ВУС «Почвенно-ландшафтное проектирование». При отсутствии

таких специалистов в проектной организации допустимо их привлечение на договорных основах из сторонних организаций, включая фирмы ландшафтного дизайна, столичные ВУЗы и т.д. в рамках финансирования соответствующего строительного или рекультивационного проекта.

4.3. В проекте почвенной конструкции должны быть научно обоснованы последовательность функциональных слоев (горизонтов), их индивидуальные размеры (мощности) и глубина расположения относительно дневной поверхности, количества (доз) использующихся почвенных материалов в расчете на единицу площади поверхности земельного участка.

4.4. Проектирование почвенных конструкций осуществляется последовательно в три этапа: подготовки информации, технологического моделирования и составления проектной документации.

4.5. На первом этапе производятся проектно-изыскательские работы в виде стандартного полевого обследования земельного участка с картографированием, отбором образцов почв и грунтов и лабораторным анализом их качества в соответствии с действующими правилами и стандартами (СанПиН 2.1.7.1287-03, ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84), обязательными при подготовке проектов строительства, комплексного благоустройства и рекультивации земель в населенных пунктах Р.Ф. Также осуществляется получение специальной информации в виде гидрофизических свойств (коэффициентов фильтрации, плотности, основных гидрофизических характеристик) почвогрунтов, почвенных материалов и их комбинаций (смесей) принятыми в почвоведении и грунтоведении методами с необходимой статистической и математической обработками данных.

4.6. На втором этапе проводится технологическое моделирование для отработки параметров почвенной конструкции с использованием современных моделей энерго-массобмена в системе «почва-растение-атмосфера» с учетом почвенно-экологической специфики территории и потребностей выбранных для озеленения растительных культур. С этой целью рекомендуется использовать универсальные компьютерные модели типа HYDRUS с приложением RETC (США), имеющие открытый интерактивный доступ. Основными

технологическими принципами проектирования являются необходимость обеспечения потребностей растительности в пространстве (почвенном ресурсе), влаге и питательных элементах из рабочей зоны конструкции размером (мощностью) Н, необходимость минимизации непродуктивных потерь влаги из почвенной конструкции, минимизации разрушения органических почвенных материалов под действием биодеструкции, оптимизации материальных расходов. Для их учета при технологическом моделировании рекомендуется следующий порядок действий:

4.6.1. В зависимости от специфики объекта, уровня его загрязнения и потребностей растительных культур определяется размер рабочей зоны почвенной конструкции Н, соответствующий объему почвенного ресурса. Рекомендуемая мощность зоны Н для типовых почвенных конструкций от 40-50 см (минимальный объем почвенного ресурса для травянистой растительности) в случае поверхностно загрязненных объектов, до 100 см, для почвогрунтов, в которых загрязняющие вещества (тяжелые металлы, легкорастворимые соли) проникли в значительных количествах (свыше ОДК) вглубь почвогрунта. Бóльшие величины допустимы лишь в специальных случаях (проекты рекультивации захоронений промышленных и бытовых отходов, полей аэрации очистных сооружений, сильнозагрязненных почв), меньшие – только при условии организации стационарных систем полива и периодического внесения удобрений (проекты почвенных конструкций плоскостных спортивно-игровых сооружений).

4.6.2. Выбирается способ экранирования рабочей зоны от нижележащей почвенно-грунтовой толщи по принципу разрыва капиллярной связи (грубодисперсный экран, гидрофобная пропитка) и соответствующие материалы для защитного экрана. Рекомендуемый универсальный способ – строительство экрана из грубодисперсного материала, лишенного капиллярных свойств (щебень, галька, керамзит…). Целесообразно использование вторсырья (рециклинг) в виде щебня из строительных отходов и материалов, получаемых при сносе ветхого жилья и иных городских сооружений. Оптимальная мощность экрана (h) – 10 см. В случае суглинистого и глинистого составов почвогрунтов на объекте во избежание

заиливания экранов в конструкции следует предусмотреть слой геотекстиля поверх щебня или использовать в качестве материала экрана грубо и среднезернистые пески. Выбор того или иного способа диктуется наличием, стоимостью материалов и финансовыми возможностями проекта. Для гравийных и песчаных материалов, обладающих капиллярными свойствами мощность экрана оценивается по формуле: h=5+(1/d), где h – проектируемая мощность экрана в см, d – средний диаметр частиц материала экрана в см. По величине h рассчитывается удельное количество материала (запас) на единицу площади почвенной конструкции: З=п*h/100, а также масса материала (m) на участок в целом: m=З*S/1000, где З – запас материала в кг/м^2, п – равновесная плотность материала в кг/м^3, h – мощность экрана в см, m – общая масса материала в тоннах на участке площадью S в м^2. Величина равновесной плотности варьирует в широких пределах от 400 кг/м^3 для керамзита до 1500 кг/м^3 для песчаных материалов и ее следует оценивать экспериментально по весу уплотненного периодическим встряхиванием материала в мерном сосуде известного объема.

4.6.3. С использованием информации об основных гидрофизических характеристиках и коэффициентах фильтрации вмещающих почвогрунтов с помощью моделей энергомассобмена в системе «почва-растение-атмосфера» оцениваются запасы влаги и их динамика в рабочей зоне почвенной конструкции Н, отсеченной экраном от нижележащего природного почвогрунта в режиме моделирования свободного гравитационного оттока влаги с нижней границы. Для ориентировочных расчетов равновесных запасов влаги при условии однородности почвогрунтов допустимо использовать номограммы из Приложения 8.1 к настоящему Регламенту .

4.6.4. Выбирается максимальный период Т существования зеленых насаждений без дополнительных осадков и поливов (в условиях г. Москвы соответствует периоду длительной летней засухи продолжительностью до 20-30 сут). Для этого периода по данным о планируемой продуктивности (приросте фитомассы) зеленых насаждений выбранного вида, темпам роста и распределения корневых систем и транспирационным коэффициентам оценивается количество потребляемой влаги

(транспирационный расход из почвы) в сопоставлении с динамикой ее запасов в рабочей зоне конструкции мощностью H.

4.6.5. Если общее количество потребляемой влаги за период T равно или меньше, чем ее запасы в рабочей зоне почвенной конструкции за вычетом непродуктивных потерь на гравитационный отток и испарение, условие удовлетворения корневого питания растений считается достигнутым. При этом не должно быть пересыхания до влажности устойчивого завядания растений приповерхностного слоя, в котором развиваются корни зачаточных форм (проростков) при посадке семенами. Если эти условия не выполняются – необходимо внесение в рабочую зону почвенных кондиционеров, увеличивающих водоудерживающую и поглотительную способность почвы и, соответственно, обоснование их доз, мощностей аккумулятивных слоев и глубин их залегания.

4.6.5. Используя информацию об основных гидрофизических характеристиках и коэффициентах фильтрации почвенных материалов и их композиций (смесей) с вмещающими почвогрунтами конструктозема в серии численных экспериментов с моделью энерго-массообмена в системе «почва-растение-атмосфера» определяются необходимые и достаточные количества почвомодификаторов и характерные размеры содержащих их аккумулятивных слоев (горизонтов) конструкции. Начинают эксперименты с минимальных концентраций почвомодификаторов и размеров аккумулятивных слоев. При их последовательном увеличении достигают оптимальных величин, при которых за расчетный период потребления данными растительными культурами их транспирационный расход и, соответственно, продуктивность при экстремальных климатических параметрах (отсутствие осадков и температура воздуха 30-35^{o}C) не снижаются до критических значений (для газонов и цветников в засушливое время 2-3 мм/сут).

4.6.7. Используя полученную в численных экспериментах информацию о концентрациях (C) почвомодификаторов и мощностях аккумулятивных слоев (h) почвенной конструкции рассчитывают удельные количества материалов (запасы) на единицу площади почвенной конструкции: З=п*h*C/10000, а

также массы материалов (m) на участке в целом: m=3*S/1000, где С – концентрация почвомодифмикатора (массовая доля) относительно массы вмещающего почвогрунта в %, остальные обозначения и единицы см. пункт 4.6.2. Для гигроскопичных материалов (органогенные почвомодификаторы) при окончательном расчете массы производится поправка на влажность (W), которая в обязательном порядке регламентируется условиями их продажи и поставки: m=(3*S/1000)*(100+W)/100.

4.6.8. По данным обследования почвогрунтов участка оценивается уровень обеспеченности питательными элементами в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству почвогрунтов Постановлениями Правительства Москвы «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве» от 27.07.2004 № 514-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 09.08.2005 № 594-ПП), «Об утверждении норм и правил проектирования комплексного благоустройства на территории г. Москвы; МГСН 1.02-02» 06.08. 2002 г. № 623-ПП, «Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы» от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП). В пересчете на действующее вещество нормативные запасы питательных элементов в рабочем слое почвенной конструкции должны составлять не менее 60 г/м^2 минерального азота, 80 г/м^2 подвижного фосфора и 120 г/м^2 подвижного калия.

4.6.9 Если указанные нормативы выдерживаются, рабочая зона почвенной конструкции является обеспеченной основными элементами корневого питания. В случае меньших запасов в проекте следует предусмотреть использование заводских растительных почвогрунтов или внесение в рабочую зону конструкции соответствующих видов удобрений в нормах, покрывающих по действующему веществу выявленный дефицит питательных элементов. При этом учитывается содержание биофильных элементов в использующихся для конструирования аккумулятивных горизонтов почвомодификаторах по информации об их сертификатах качества (паспортах) или при отсутствии таковой – по данным дополнительного химического анализа образцов. Поскольку производители органических почвомодификаторов часто специально обогащают их

элементами питания, используя высокую поглотительную (ионо-обменную) способность высокодисперсных органических веществ, дополнительного внесения удобрений в конструкциях на их основе может и не потребоваться.

4.6.10. По данным о потенциальной биодеструкции (периоде полураспада) используемых органических материалов (почвенных кондиционеров) и вертикальном распределении биологической активности (дыхания почвы) в почвенно-грунтовой толще с помощью моделей динамики органических веществ в почвах оценивается оптимальная глубина заложения аккумулятивных слоев конструкции, исходя из проектного срока службы конструкции (не менее 7-10 лет). Для ориентировочных расчетов допустимо использовать номограммы, приведенные в Приложении 8.2 к настоящему Регламенту, входной информацией к которым служит определяемая в ходе обследования участка величина мощности биогенного слоя (гумусово-аккумулятивного горизонта) исходного почвогрунта. Для большинства природных и синтетических почвомодификаторов срок службы на поверхности не превышает 2-3 лет. Их внедрение в почву гарантирует увеличение этого срока в несколько раз в зависимости от глубины залегания (экранирования) от поверхности. При больших дозах органических почвомодификаторов рекомендуется проектировать их внесение не одним, а двумя и более раздельными слоями, один из которых располагается вблизи поверхности, а другие – последовательно заглубляются.

4.6.11. Если вмещающие почвогрунты рабочей зоны конструктозема исходно загрязнены (засолены электролитами) в процессе технологического моделирования с применением модели энерго-массообмена в почвах осуществляется расчет минимальной промывной нормы, гарантирующей снижение концентраций вредных веществ в рабочей зоне Н до нормативно-допустимого уровня. При этом наряду со стандартной гидрофизической информацией (см. 4.6.1 и 4.6.4) используются данные о загрязнении (засолении) почвогрунтов, полученные в ходе обследования участка на проектно-изыскательской стадии (см. 4.5), а при наличие физико-химических механизмов взаимодействия загрязняющих веществ

и солей с твердофазными компонентами почвы (гидродинамическая дисперсия, адсорбция, ионный обмен) – соответствующие характеристики этих процессов в виде уравнений межфазных взаимодействий с экспериментально определенными параметрами.

4.7. На третьем, завершающем этапе проектирования полученные в ходе проектных изысканий и технологического моделирования данные обобщаются в виде проекта почвенной конструкции, включающего схематический план, рабочий чертеж конструкции и пояснительную записку. Схематический план почвенной конструкции наносится на листе типового плана участка в масштабе 1:500, повторяя контуры ландшафтной формы, подлежащей озеленению (газон, цветник) или рекультивации. Рабочий чертеж конструкции должен отражать вертикальную последовательность функциональных горизонтов (слоев) с указанием их мощностей и состава (почвенных материалов), при выдерживании масштабных пропорций относительно друг друга и общей мощности (вертикального размера) конструктозема в целом. В пояснительной записке должен быть приведен перечень использующихся почвенных материалов, указаны их дозы в расчете на единицу площади участка, а также общие количества с учетом площади участка и числа формируемых слоев почвенной конструкции.

4.8. Использующиеся для конструирования почвенные материалы в виде почвогрунтов должны иметь сертификаты качества в соответствии с действующей в г. Москве системой добровольной сертификации «Экологичные почвогрунты» и требованиями, предъявляемыми к качеству почвогрунтов Постановлениями Правительства Москвы «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве» от 27.07.2004 № 514-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 09.08.2005 № 594-ПП), «Об утверждении норм и правил проектирования комплексного благоустройства на территории г. Москвы; МГСН 1.02-02» 06.08. 2002 г. № 623-ПП, «Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы» от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП).

4.9. Иные материалы в виде почвенных кондиционеров должны иметь стандартные сертификаты качества,

предусмотренные законодательством РФ и гарантию безопасности для здоровья человека и компонентов окружающей среды при их внесении в почву в количествах (дозах), предусмотренных проектом почвенной конструкции. Некоторые примеры почвенных материалов для конструирования, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям помещены в таблице Приложения №3 к настоящему Регламенту.

4.10. На основе этих материалов для распространенных в условиях г. Москвы ландшафтов с отложениями легкого гранулометрического состава разработан и апробирован ряд типовых вариантов почвенных конструкций под выращивание газонной растительности при высокой антропогенной нагрузке. Проектная информация по ним помещена в Приложении №4 к настоящему Регламенту и ее можно использовать на практике озеленения подобных объектов, минуя этап технологического моделирования.

4.10.1 Типовые конструкции на легких отложениях с одним аккумулятивным слоем следует проектировать под многовидовые разнотравные и мавританские газоны в селитебной зоне, вдоль тротуаров, автомагистралей, пешеходных дорожек и иных элементов территорий с повышенной антропогенной нагрузкой.

4.10.2. Типовые конструкции на легких отложениях с двойными аккумулятивными слоями суммарной мощностью не менее 20 см рекомендуются под цветники и партерные газоны, а также любые формы травянистой растительности на особо ответственных объектах озеленения в центре города.

4.11. Если почвогрунты имеют достаточную водоудерживающую способность и актуальное плодородие (обогащенность питательными элементами) под вариантами обычных разнотравных газонов можно использовать самые простые почвенные конструкции без дополнительных аккумулятивных слоев с прокладкой лишь одного грубодисперсного экрана на 40-50см удалении от поверхности.

4.12. В случае спортивных газонов, а также участков с повышенной поверхностной нагрузкой (автомобильные стоянки, лужайки для отдыха) глубина заложения щебнистого экрана может быть уменьшена до 20-30см, однако такие

конструкции, выдерживая значительные вертикальные нагрузки, не в состоянии будут обеспечивать рост и развитие травянистой растительности без организации регулярных поливов, особенно в засушливое время. Поэтому для них необходимо предусмотреть в проекте стационарную систему полива, а также регулярное внесение удобрений, что обычно и реализуется на стадионах, кортах или полях для гольфа с травянистыми покрытиями.

4.13. Для отдельных участков под комплексное благоустройство и рекультивацию земель с высоким уровнем техногенной нагрузки рекомендуется использовать примитивные защитные конструкции, в которых грубодисперсный экран располагается непосредственно на поверхности почвогрунта, окружая отдельные группы древесно-кустарничковой растительности и цветочные клумбы. Его мощность должна быть не менее 10-20см, а материал (декоративный щебень, гравий, галька) должен быть химически инертным и устойчивым к механическим воздействиям. Под слоем грубодисперсного материала вдоль магистралей можно располагать торфяной почвомодификатор для поглощения угарного газа и иных загрязняющих атмосферу газообразных компонентов, адсорбции вредных растворенных веществ и очистки поверхностных вод при их свободной фильтрации через подобные конструкции. Грубодисперсные отсыпки не только предохраняют поверхность от механического воздействия при наездах техники и движении пешеходов, от пыления в сухое время года, но и переводят поверхностный сток во внутрипочвенный с очисткой вод от техногенных загрязнителей и противогололедных солей. Под ними сохраняется нормальное функционирование почвенных микроорганизмов, мезофауны, аккумулируется влага, осуществляется функция биодеструкции органических отходов, ремедиации жидкой и газовой фаз и иные экологические функции городских почвенных объектов.

5. ПОРЯДОК ДЕЙСТВИЙ ПО СОЗДАНИЮ ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

5.1. Создание почвенных конструкций для озеленения, комплексного благоустройства и рекультивации территорий с

высокой антропогенной нагрузкой должно осуществляться юридическими лицами в соответствии с принятыми в Р.Ф. и г. Москве нормативными документами, регламентирующими порядок подготовки и производства соответствующих земляных и строительных работ и на основании ордера об их проведении. Несанкционированное создание почвенных конструкций физическими и юридическими лицами в г. Москве запрещается, поскольку оно может нанести ущерб природным объектам города, подземным коммуникациям и строениям, а также здоровью человека при проведении работ на загрязненных территориях.

5.2. Созданию почвенных конструкций должны предшествовать запланированные проектом озеленения или рекультивации земель ландшафтные работы с расчисткой территории, первичной разметкой ландшафтных форм, планировкой поверхности, прокладкой подземных коммуникаций и инженерно-технических сооружений.

5.3. Сплошные почвенные конструкции реализуются на выровненной (спланированной) территории с уклонами не более 10^{o}. Если территория имеет бóльшие уклоны, необходимо террасирование склонов, в противном случае боковой сток в грубодисперсном экране будет приводить к неблагоприятному эффекту осушения рабочей корнеобитаемой зоны конструкции.

5.4. При проведении подготовительных работ необходимо снять и сохранить плодородный слой почвогрунта для использования его при последующем почвенном конструировании и озеленении, если качество плодородного слоя соответствует принятым нормам в отношении загрязнения. Места складирования снятого плодородного слоя должны предусматриваться общим проектом рекультивации, озеленения и благоустройства территории.

5.5. На подготовленной территории производится разметка почвенной конструкции в соответствии с контурами ландшафтных форм на общем плане участка под озеленение, комплексное благоустройство или рекультивацию земель. Вместо разметочных кольев рекомендуется использовать отрезки металлического прута (арматуры), которые легко можно забить на глубину 30-40 см, что гарантирует сохранность разметки при проведении последующих земляных работ.

Полученные таким образом маркеры поверхностного контура конструкции соединяются лентой или веревкой из прочного материала.

5.6. Строительство почвенной конструкции начинается с подготовки ее ложа и закладки защитного экрана. После снятия плодородного слоя производится дальнейшая экскавация почвогрунта на проектную глубину и после выравнивания основания (дна) полученной выемки на ее дно укладывается слой грубодисперсного материала (щебень, галька, гравий, керамзит…), выполняющий функцию защитного экрана. Для снятия грунта и выравнивания основания целесообразно использовать строительную технику в виде трактора-универсала JCB или боб-кэта. При сложном контуре ландшафтной формы часть работ по экскавации грунта и выравниванию границ выполняется вручную.

5.6.1. Если основание будущей конструкции сложено уплотненными обесструктуренными почвогрунтами с низкой водопроницаемостью, во избежание застоя влаги, необходимо перед укладкой материала экрана либо произвести рыхление, либо предать основанию небольшой уклон (2-3^{o}) в сторону потенциальной дрены – дорожной полосы, ливневки, кювета и т.д. При строительстве конструкции рядом с проезжей частью рекомендуется вдоль бортового камня со стороны будущего газона провести пластмассовую трубу-коллектор на уровне ложа конструкции для сброса загрязненных дренажных вод в канализационные колодцы дороги. При наличии двух дорог (тротуаров), окаймляющих конструкцию с газоном на равнинной территории, можно создавать двускатный профиль основания с уклонами от средней линии газона к правой и левой границам (кромкам дорог).

5.6.2. Материал экрана укладывается на поверхность основания, разравнивается, прокатывается ручными катками, поливается водой и перекрывается сверху исходным почвогрунтом, предусмотренной в проекте мощностью вплоть до следующего функционального слоя или поверхности почвы в самом простом варианте конструкции. Смачивание щебня необходимо во избежание просыпания перекрывающего почвогрунта в щели между камнями. С этой же целью на особо ответственных объектах можно использовать предварительную

прокладку геотекстиля. Все работы осуществляются с применением специальной техники и ручного труда (см. пункт 5.6)

5.7. Поверх слоя возвращенного почвогрунта после уплотнения катками наносится рабочий аккумулятивный слой конструкции заданной мощности, содержащий органический почвомодификатор или его смесь (композицию) с исходным почвогрунтом в соответствии с проектом конструкции.

5.7.1. Если используется торфяной (торфосапропелевый) почвомодификатор, он наносится на поверхность вмещающего почвогрунта в виде сплошного слоя проектной мощности. Если проектом предусмотрен один подобный слой, он располагается вблизи поверхности, для обеспечения питания укоренившихся молодых растений и перекрывается предохраняющим от биодеструкции и возгорания 3-5см исходного плодородного грунта или в случае его загрязненности – привозным растительным почвогрунтом заводского изготовления. В случае двух и более аккумулятивных слоев, резервные заглубляются на предусмотренные проектом, что позволяет значительно снизить их биодеструкцию и сохранить на долгое время эксплуатации конструкции. Промежутки между аккумулятивными слоями с предусмотренной проектом мощностью выполняются исходными почвогрунтами с уплотнением катками, причем предпочтительнее использовать заготовленный при подготовке территории верхний плодородный горизонт.

5.7.2. Если в качестве влагоаккумулятивного материала функциональных элементов конструкции применяются синтетические гидрогели необходимо предварительно их подготовить к использованию. Для этого за сутки до укладывания соответствующего слоя необходимо дать гелю возможность набухнуть в чистой воде. Расчетное по проекту количество СПГ засыпается в емкости и заливается водой в пропорции 1:10-1:15 (на 1 объем сухого геля 10-15 объемов воды) с периодическим перемешиванием. После чего емкости в закрытом состоянии оставляются на 10-12 часов для реализации свободного набухания гидрогеля. Набухший гель распределяется равномерным слоем на поверхности функционального слоя почвенной конструкции и перемешивается вручную или посредством мотокультиватора с

массой вмещающего почвогрунта в пределах проектной мощности слоя. После этого поверх слоя с гидрогелем насыпается изолирующий плодородный горизонт или растительный почвогрунт заводского происхождения. Если в конструкции запланировано два и более аккумулятивных слоя с гидрогелем, резервные создаются таким же способом на удалении от поверхности до предусмотренных проектом глубин с перекрытием исходным почвогрунтом и его уплотнением ручными катками.

5.8. Подвоз материала и нанесение слоев почвенных конструкций осуществляется с применением мобильной техники (JCB-универсал, боб-кэт), а также ручного труда с использованием садовых тачек в случае небольших размеров участков. При нанесении каждого функционального слоя (почвенного материала) в предусмотренных проектом количествах следует следить за тщательностью его выравнивания и уплотнения, добиваясь при этом выдерживания проектной мощности горизонта.

5.9. После формирования всей последовательности функциональных слоев почвенной конструкции осуществляется ее влагозарядковый полив и высадка растений. Обильный полив из расчета полной влагоемкости рабочей толщи конструкции способствует окончательной консолидации конструкции. Если после насыщения конструкции влагой обнаружились просадки с поверхности, их заполняют плодородным растительным почвогрунтом до проектных отметок.

5.9. Посадка травянистых растений осуществляется согласно Правилам создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы способами ручного посева семян, гидропосева, раскладки готового газонного дерна, ручной посадки кустов (вырезок) из дернины и индивидуальных экземпляров растений цветников по рекомендуемым в Правилах нормам высева (посадки) на единицу площади. В случае посадки семенами при неглубокой заделке целесообразно укрыть поверхность лутрасилом с закреплением шпильками во избежание быстрого иссушения поверхности и склевывания семян птицами.

6. ПОРЯДОК СОДЕРЖАНИЯ ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ЗЕЛЕНЫХ НАСАЖДЕНИЙ.

6.1. Основным условием нормального функционирования растительности на территории города является правильно организованный и своевременный уход за нею и за состоянием почвы, осуществление которого регламентируется Правилами создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП).

6.2. Вместе с тем специфика почвенных конструкций, их высокий ресурсный потенциал по отношению к потребностям растений в отличии от обычных городских почвогрунтов требует корректировки некоторых положений вышеуказанных Правил в части ухода за состоянием конструктоземов и выращиваемой на них растительности.

6.3. В условиях постоянной антропогенной и техногенной нагрузок в виде загрязнения и засоления почв необходимо осуществление периодических (раз в 3-4 года) промывок почвенной конструкции. Промывка осуществляется расчетными нормами поливной влаги, чтобы вывести вредные вещества за пределы корнеобитаемой толщи, отсеченной экраном. Ее удобно проводить весной, после схода снега или осенью в период дожей, когда почва насыщена влагой и хорошо проводит ее вглубь, а вредные вещества находятся в равновесном растворе в максимальном количестве. Промывная норма рассчитывается по данным о полной влагоемкости и уровне засоления (загрязнения) рабочего слоя почвы, например, с использованием показателя электропроводности, согласно несложным алгоритмам мелиоративного почвоведения. Ориентировочно в период обводнения типовой почвенной конструкции с мощностью рабочей зоны 40-50см для очищения ее корнеобитаемой толщи достаточно 80–100 л/м^2 поливной влаги.

6.4. Помимо профилактических промывок, направленных на борьбу с загрязнением и засолением почв, необходима организация поливов зеленых насаждений, испытывающих неизбежный в условиях города дефицит влаги, особенно в засушливые летние периоды.

6.4.1. Способность рабочего слоя почвенных конструкций аккумулировать влагу позволяет значительно сократить как частоту, так и объемы поливов, рекомендуемые в Правилах создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы. После ливневых осадков или обильного влагозарядкового полива в конце мая – начале июня с формированием запаса влаги в корнеобитаемой зоне порядка 100-150мм можно вообще не поливать обычные газоны в течение 20-30 суток. Лишь для партерных газонов и цветников при этом рекомендуются освежающие поливы в утренние часы с нормой 2-3 л/м^2 раз в 2-4 сут. Если в середине вегетационного сезона устанавливается длительная засуха, следует повторять влагозарядковые поливы конструкций (100-150 л/м^2) не чаще 1 раза в 15дней. Указанный порядок касается конструкций со взрослыми растениями с хорошо развитой корневой системой и сомкнутым травостоем газонов.

6.4.2. Для вновь создаваемых газонов и цветников регламент полива несколько иной. Наряду с влагозарядковыми поливами на период проращивания семян и укоренения растений требуется периодическое смачивание поверхности с нормой 1-3 л/м^2 до появления всходов ежедневно. При этом нельзя допускать размыва поверхности и смыва семян, для чего распыленную струю воды следует направлять вверх и непрерывно перемещать, не допуская застоя и появления потоков воды на поверхности почвы. По мере развития газона частота таких освежающих поливов сокращается до 1 раза в 3-4 сут. После укоренения и развития надземной фитомассы режим полива становится таким как у взрослых растений (см. пункт 6.4.1.). Если естественных осадков достаточно (интенсивные дожди с периодичностью не реже 1 раза в 7-10 дней), необходимость во влагозарядковых и дополнительных освежающих поливах отпадает.

6.5. Для промывки конструкции и поливов рекомендуется использовать специальные насадки, которые позволяют равномерно увлажнить почву, не допуская ее размыва. Для особо ответственных объектов необходимо установить стационарную ирригационную систему со скрытыми дождевальными насадками, работающими от стационарного источника воды под давлением не менее 1–2 атм и дающими

интенсивность дождевания 3–10 мм/час при радиусе разлета капель 2–6м. При среднем расстоянии между насадками 4м (индивидуальная площадь орошения 12–13 $м^2$ на партерный газон обычных для города размеров (100–200 $м^2$) требуется порядка 8–16 насадок. Допустимая интенсивность при орошении дождеванием определяется в зависимости гранулометрического состава почвы, от уклона местности и наличия растительности согласно таблице Приложения №5 к настоящему Регламенту. При этом целесообразно основную часть полива (70–80%) осуществить в утренние и вечерние часы (а при автоматической системе – можно и ночью), потратив остаток на освежающие поливы в жаркое время суток.

6.6. Наряду с поливами в регламент эксплуатации почвенных конструкций для выращивания зеленых насаждений входят обычные агротехнические приемы содержания газонов и цветников, прописанные в Правилах создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы (скашивание травостоя, разрушение снежных валов, образовавшихся при очистке садовых дорог и тротуаров в период снегопада, рыхление, механическая обработка дернины, заключающаяся в прикатывании и прочесывании в сочетании с прорезанием и прокалыванием дернины для улучшения аэрации почвы, внекорневая подкормка и внесение удобрений, прополка, сбор мусора и опавших листьев, землевание и внесение компостов, мульчирование, утепление цветников на зиму, выкопка и пересадка луковиц и клубней цветковых растений, ремонт дернины с подсевом трав на нарушенных (деградированных) участках, обрезка растительности у бортов газона, обработка агрохимикатами, обработка биостимуляторами и природными гуматами в соответствии с Технологическим регламентом применения природных гуматов для ремедиации загрязненных городских почв и в целях стимулирования развития растений (разработка АНО «Экотерра» и ф-та почвоведения МГУ.

6.7. Использование минеральных удобрений следует лимитировать. В рабочем слое почвенной конструкции на основе обогащенных органических почвомодификаторов, природных и заводских почвогрунтов находится достаточно для роста и развития культур минеральных веществ, в оптимальных, сбалансированных количествах. В обеспеченной с

агрохимической точки зрения рабочей зоне почвенной конструкции (см. пункт 4.6.8) исходно должен быть создан запас биофильных элементов минимум на 10 лет бесперебойного снабжения потребностей травянистой растительности.

6.7.1 Учитывая это, а также эффект подвешивания влаги и минимальный непродуктивный вынос биофильных элементов в составе почвенного раствора за пределы корнеобитаемого слоя конструкции, можно рекомендовать двукратное снижение регламентируемых Правилами создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы подкормок газонов. Подкормку следует производить лишь в фазу активного роста газона весной, в особенности в первый год посадки с дозами порядка 8-10 г/м^2 азота, 3-4 г/м^2 фосфора и 5-7 г/м^2 калия в пересчете на действующее вещество.

6.7.2. Если осуществлялась промывка почвенной конструкции от загрязняющих веществ и минеральных солей, сразу после промывки следует провести процедуру зарядки плодородных слоев биофильными элементами, поскольку они могут выщелачиваться из корнеобитаемого слоя при промывках наряду с загрязняющими веществами. Для этого в увлажненную после последней промывки почву следует внести минеральные удобрения в количествах азота – 20, фосфора –30, калия – 40 г/м^2 по действующему веществу, что соответствует 30% от указанных в пункте 4.6.8 норм агрохимической обеспеченности. После внесения солей на поверхность следует полить почву 5-10 л/м^2 воды для распределения минеральных удобрений в корнеобитаемой зоне.

6.8. Правильно организованный уход за почвенными конструкциями и растениями в отношении органо-минерального питания состоит в компенсации потерь веществ из почвы при отчуждении фитомассы (при скашивании и уборки листа). В связи с этим целесообразно организовать компостирование убираемой продукции с последующим внесением (подсыпкой, заделкой) компоста в верхний горизонт почвы в сочетании с землеванием, согласно Правилам создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы.

6.9. Компостирование следует осуществлять в два этапа – предварительная обработка скошенной массы для удаления

загрязняющих веществ и собственно компостирование. Обработка в простейшем случае заключается в суточном вымачивании фитомассы с последующим удалением водного раствора. Компостирование можно осуществлять в компостных ямах, кучах (буртах), с использованием минерального грунта и природных биополимеров (торфа, навоза…) по известным технологиям. Регулярное внесение компоста в дозах от 50-100 граммов на $м^2$ будет способствовать повышению биоактивности и плодородия почвенной конструкции и полностью удовлетворять потребности растений в питательных веществах, включая микроэлеметы. При этом правильно компостированный материал аналогичен гумусу почвы и благоприятно воздействует не только на химические, но и на физические свойства почвы, а также на состояние и жизнедеятельность почвенных организмов, стимулируя важнейшие экологические функции почвенного покрова по очистке вод и атмосферного воздуха.

6.10. Особое внимание следует уделять процедуре скашивания травостоя. Регламентированная действующими Правилами создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы процедура предполагает определенную периодичность скашивания надземной фитомассы в зависимости от типа газона. При этом не учитывается специфика погодных условий, включая весьма вероятные длительные засухи в столичном мегаполисе. Сенокошение на период засух следует запретить там, где нет стационарных систем полива, обеспечивающих ежедневное дождевание. Удаление фитомассы (транспирирующей поверхности газона) в засуху равносильно его гибели, поскольку корни при этом не в состоянии поглощать воду и растворенные питательные вещества из влагоаккумулятивных слоев почвенной конструкции из-за отсутствия транспирирующего потока с листовой поверхности.

6.11. В остальном порядок эксплуатации и содержания растительности на почвенных конструкциях для обеспечения устойчивости зеленых насаждений и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой соответствует общим Правилами создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред.

постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП).

7. ВОЗМОЖНЫЕ НАРУШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЧВЕННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

7.1. Нарушения технологии могут происходить на стадиях проектирования, создания и эксплуатации почвенных конструкций.

7.2.Ошибки в проектировании связаны с шаблонным подходом и попытками использования неких универсальных параметров почвенных конструкций с пренебрежением этапов технологического моделирования и получения необходимой для моделей экспериментальной информации.

7.2.1.Одна из наиболее серьезных технологических ошибок – неправильно определенная граница положения протекторного грубодисперсного экрана. При малой глубине для обычных вариантов газонов это означает нехватку почвенного ресурса и запасов влаги с неизбежным завяданием газона без организации поливов. При большой глубине, в особенности на почвах легкого гранулометрического состава, возникает сильный дренаж и иссушение поверхностного слоя с завяданием растений с неглубокой корневой системой и нехваткой влаги для прорастания семян. Во избежание подобных ошибок следует строго придерживаться регламента проектирования, а при отсутствии у подрядной организации соответствующих специалистов, владеющих методами и моделями технологического моделирования, привлекать их со стороны для составления данной части проекта озеленения и комплексного благоустройства городской территории.

7.3. Возможные нарушения при создании почвенных конструкций – не выдерживание проектных характеристик в виде последовательности и мощностей соответствующих функциональных горизонтов (слоев) конструкции, неравномерное внесение и распределение почвомодификаторов, уменьшение их проектных доз (концентраций), использование некондиционных почвомодификаторов и почвогрунтов, не прошедших сертификацию, использование сухих гидрогелей без предварительного замачивания и набухания, использование не

очищенного от мелкозема грубодисперсного материала для экранов (карьерный гравий вместе с песком и глиной), уменьшение норм полива при влагозарядке конструкции, использование некондиционной рассады и семян при создании растительного покрова конструкции.

7.4. Земельные работы по участку должны быть завершены до момента реализации проекта почвенного конструирования. Значительный ущерб слоистым конструкциям наносят внеплановые земельные работы на данной территории (ремонт и строительство подземных коммуникаций, прокладка дорог и пешеходных троп, высадка крупномерных древесных насаждений, траншейная посадка кустарников и т.д.). В этом случае подрядная организация должна быть извещена о наличии почвенной конструкции и снабжена рабочим чертежом (планом) конструкции с указанием последовательности, мощности и состава ее функциональных слоев.

7.4.1. Раскопку конструкции необходимо производить последовательно, снимая слой за слоем, складируя материал каждого слоя по отдельности, не допуская их смешивания. При осуществлении раскопок стенки траншеи (шурфа) следует укреплять щитами из прочного материала во избежание осыпания слоев конструкции. Если в дальнейшем участок сохраняет свою исходную принадлежность, повреждения почвенной конструкции, особенно ее протекторному экрану в основании должны быть ликвидированы при восстановлении почвенного и растительного покрова.

7.5. Во избежание нарушения технологического регламента, после создания или восстановления почвенной конструкции и растительного покрова участка согласно действующим Правилам создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы необходимо произвести приемку объектов с анализом на соответствие проектному решению. При этом в части, касающейся почвогрунтов, исследуется в первую очередь соответствие последовательности и мощностей функциональных слоев конструкции проектным характеристикам.

7.5.1. Организация-подрядчик несет ответственность за качество работ по строительству почвенной конструкции как функциональному элементу озеленения и комплексного

благоустройства территории и в случае выявленных нарушений, должна исправить все недочеты собственными силами и средствами.

7.6. Наиболее вероятные нарушения технологии в процессе эксплуатации почвенных конструкций связаны с отсутствием организации контроля за их состоянием и необходимых текущих мероприятий по уходу за конструкциями и растительным покровом в соответствии с технологическим регламентом.

7.6.1. В жаркое время года возможно пересыхание рабочих слоев конструкции с коагуляцией коллоидных органических почвомодификаторов (гидрогелей, торфа) и ухудшением их водоудерживающей и поглотительной способности при последующем размачивании. Поэтому в ходе эксплуатации почвенных конструкций особенно важно придерживаться регламента поливов, вовремя осуществляя влагозарядковые поливы в засушливый период года.

7.6.2. Сильно влияет на состояние зеленых насаждений уровень техногенного загрязнения (засоления) корнеобитаемой толщи конструкции в условиях повышенной антропогенной нагрузки. В этой связи обязательным технологическим условием их устойчивого функционирования является оперативная организация периодических промывок по данным мониторинга электропроводности (засоления электролитами).

7.6.3. Постепенное ухудшение работы конструкции может наблюдаться к концу проектного периода ее функционирования и по причине биодеструкции органических почвомодификаторов верхнего рабочего слоя. При выявлении этого процесса следует внести в рабочий слой дополнительное количество почвомодификаторов, а также активнее использовать регламентированную Правилами создания, содержания и охраны зеленых насаждений г. Москвы процедуру землевания газонов с внесением компостов.

7.7. Во всех перечисленных случаях нарушения технологии почвенные конструкции не будут в полной мере давать ожидаемого эффекта для озеленения и выполнения иных почвенно-экологических функций. Также возможно снижение их устойчивости по отношению к антропогенной нагрузке и сокращение запланированного проектом срока службы.

8. ПРИЛОЖЕНИЯ К РЕГЛАМЕНТУ

8.1. Приложение №1 Номограммы расчета равновесных запасов влаги в почвенной толще Н (см. рис.5.11, глава 5)

8.2. Приложение №2 Номограммы для расчета глубины заложения органических материалов почвенных конструкций для их защиты от биодеструкции (см. рис.5.15, глава 5)

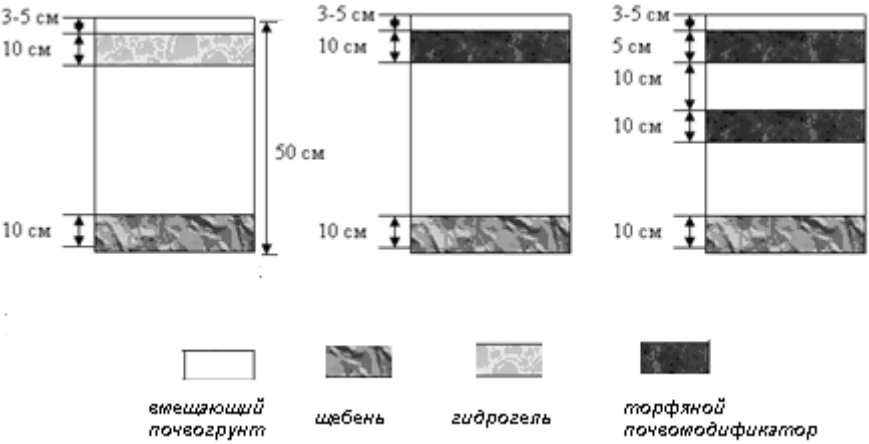
8.3. Приложение №3 Рекомендуемые материалы для почвенных конструкций в условиях г. Москвы и их производители.

Название материала, торговая марка	**Характер использования в конструкции**	**Производитель**
Сертифицированные почвогрунты заводского изготовления, «ЭкоМарин»	Вмещающий почвогрунт, материал рабочего слоя	ООО «ЭкоМарин», г. Москва
Торфосапропелевые твердофазные почвомодификаторы, «AridGrow»	Почвомодификатор рабочего слоя	ООО «МНЦП ЮНЕПКОМа», г. Москва
Сильнонабухающие полимерные гидрогели, «ВУМ-ИТХ», «ВУМ-Г», «ВУМ ГМЦ»	Влагоадсорбент-почвомодификатор рабочего слоя	Уральский химический завод, и ИТХ УОРАН г.Пермь

8.4. Приложение №4 Проектная информация по типовым вариантам почвенных конструкций для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой на отложениях легкого гранулометрического состава.

Проектная мощность рабочей зоны (почвенного ресурса): 40см

Схематический чертеж конструкций:



Параметры конструкций:

№	*Функциональные слои, глубина залегания от-до, см*	*Использующиеся материалы*	*Концентрации от массы вмещающего материала, %*	*Удельный расход сухого материала, кг/м^2*
1	*Экранирующий поверхностный слой, 0-3(5)*	*Плодородный почвогрунт*	*100*	*40-60*
	Аккумулятивный слой, 3(5) - 13 (15)	*Гидрогель*	*0,1-0,2*	*0,15-0,30*
	Перекрывающий слой почвогрунта, 13(15)-40	*Исходный почвогрунт*	*100*	*350-400*
	Грубодисперсный экран, 40-50	*Щебень*	*100*	*150*
2	*Экранирующий поверхностный слой, 0-3(5)*	*Плодородный почвогрунт*	*100*	*40-60*
	Аккумулятивный слой, 3(5) - 13 (15)	*Торфяной почво-модификатор*	*100*	*40-50*

	Перекрывающий слой почвогрунта, 13(15)-40	*Исходный почвогрунт*	*100*	*350-400*
	Грубодисперсный экран, 40-50	*Щебень*	*100*	*150*
3	*Экранирующий поверхностный слой, 0-3(5)*	*Плодородный почвогрунт*	*100*	*40-60*
	Аккумулятивный слой, 3(5) - 8 (10)	*Торфяной почво-модификатор*	*100*	*20-25*
	Перекрывающий слой почвогрунта, 8(10)-18(20)	*Исходный почвогрунт*	*100*	*150*
	Аккумулятивный слой, 18(20) - 28(30)	*Торфяной почво-модификатор*	*100*	*40-50*
	Перекрывающий слой почвогрунта, 28(30)-40	*Исходный почвогрунт*	*100*	*150-180*
	Грубодисперсный экран, 40-50	*Щебень*	*100*	*150*

Приложение №5 Допустимая интенсивность дождевания почв [Экологические требования, 96]

Гранулометрический состав почв	**Допустимая интенсивность искусственного дождя (мм/мин) при уклоне поверхности:**			
	Уклон<0,05	**0,05-0,08**	**0,08-0,12**	**>0,12**
Среднесуглинистые	0,42* / 0,21	0,34 / 0,17	0,25 / 0,13	0,17 / 0,09
Среднесуглинистые, подстилаемые более плотной породой	0,25 / 0,13	0,21 / 0,11	0,17 / 0,07	0,13 / 0,04
Тяжелые суглинки и глины	0,09 / 0,07	0,07 / 0,04	0,05 / 0,03	0,04 / 0,02

*В числителе – с растительным покровом, в знаменателе – без.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе заложены научно-методические и экспериментальные основы почвенного конструирования – инновационного направления, позволяющего с помощью технологического моделирования создавать оптимальные по своим характеристикам плодородные почвы (конструктоземы) на базе имеющихся почвенных ресурсов и натуральных или синтетических материалов – почвенных кондиционеров. Наиболее продуктивный путь почвенного конструирования заключается в слоистом способе закладки материалов, имитирующем реально существующий в природе процесс вертикальной дифференциации почв на отдельные слои-горизонты, различающиеся по своим функциональным качествам. Основным элементом конструкции является так называемый «рабочий слой», в котором сосредотачиваются корневые системы растений, и из которого они будут впоследствии потреблять элементы питания и влагу. Для формирования рабочего слоя используются природные или синтетические биополимеры, добавление которых к исходному грунту увеличивает его плодородие в виде запаса доступных питательных веществ, оптимизирует структуру, тепловые и водно-физические характеристики почвы.

Тестирование разнообразных вариантов почвенных конструкций как в аридных климатических условиях (страны Персидского залива, предшествующие эксперименты), так и в специфичных, иногда конвергентных с ними условиях мегаполиса выявили значительные преимущества технологии почвенного конструирования для озеленения городских территорий с повышенной антропогенной нагрузкой. Почвенные конструкции являются эффективным средством регуляции гидротермического режима корнеобитаемой толщи.

Слоистые конструкции позволяют значительно в 2-3 раза и более повысить водоудерживающую способность и запасы продуктивной влаги в почвогрунтах и обеспечить тем самым потребности растительности, в том числе и в экстремальные периоды засух. При этом эффективным оказываются не только слои с влагоадсорбентами в виде природных (торфа, торфосапропелевые модификаторы) и синтетических (гидрогели) биополимеров, но и абсолютно лишенный

водоудерживания щебень. Последний увеличивает водный запас из-за разрыва капиллярной сплошности и «подвешивания» влаги в верхней толще.

Внедрение слоев СПГ, торфа и (или) щебня позволяет снизить фильтрацию и впитывание влаги в 3-4 раза, испарение в 1,5-3 раза, сократив тем самым непродуктивные потери влаги. Температурный режим слоистых конструкций также более благоприятный, чем в исходных почвогрунтах. В ночное (холодное) время конструкции аккумулируют на 1-2^{o}С больше тепла, и сглаживают в 1,5-2 раза амплитуды суточных колебаний температуры в различных слоях корнеобитаемой толщи.

Конструкции со щебнистыми экранами являются надежным средством защиты от вторичного антропогенного засоления (загрязнения) эксплуатируемых земель в верхней корнеобитаемой толще. Экраны, разрывая капиллярную сплошность не дают водорастворимым поллютантам возвращаться назад и концентрироваться в корневой зоне при восходящих потоках влаги к испаряющей поверхности. Специальные разовые промывки почвенных конструкций в аридных условиях или обычные осадки в гумидных позволяют за короткий срок (0,5-1мес) довести уровень водорастворимых загрязнителей в корневой зоне до нормативно-чистого.

Влагоаккумулятивные качества конструкций, наряду с дополнительным снабжением растений питательными элементами и защитой от вредных (токсичных) веществ позволяют формировать на них устойчивые, высокопродуктивные растительные сообщества, фитомасса и биометрические показатели которых в 2-3 и более раз превышает таковые на контроле. В аридных условиях достигается двукратная экономия поливной влаги – наиболее ценного природного ресурса, лимитирующего развитие земледелия и освоение пустынных территорий. В связи большими запасами каустобиолитов торфа, лигнитов, а также природного газа, являющегося потенциальным сырьем для синтеза СПГ, Россия может стать мировым лидером в экспорте природных, модифицированных и синтетических почвомодификаторов для устойчивого земледелия в аридных условиях и борьбы с глобальной тенденцией аридизации суши.

В процессе работы обобщены результаты технологического моделирования и экспериментов по тестированию почвенных конструкций для выращивания зеленых насаждений и составлен технологический регламент их проектирования, создания и эксплуатации в условиях столичного мегаполиса. Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокие водоудерживающая способность и биологическая активность при аккумуляции биофильных элементов в корнеобитаемом слое и его экранировании от вторичного засоления (загрязнения) водорастворимыми формами поллютантов; увеличение эксплуатационного срока службы плодородного слоя и устойчивости зеленых насаждений. Рекомендации по внедрению – разработанные почвенные конструкции могут найти широкое применение в практике озеленения и благоустройства мегаполиса, заменив малоэффективные традиционные технологии с поверхностной подсыпкой неустойчивых торфопесчаных смесей. Наиболее подходящими объектами технологии могут быть газоны и цветники вдоль дорожно-транспортных сооружений, придомовых территорий, сильнозагрязненные участки под рекультивацию, а также особо ответственные объекты озеленения центральной части города. Эффективность конструкций определяется их устойчивостью к факторам природной (биодеструкция) и антропогенной (загрязнение, засоление) деградации почв в условиях мегаполиса и способностью обеспечивать зеленые насаждения необходимым для их продуктивного функционирования запасом влаги, тепла, элементов минерального питания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Абрамашвили Г.Г.* Каким должен быть газон // Городское хозяйство Москвы, №4, 1985 с. 23-34.
2. *Абросимова Л.Н.* Влияние искусственной структуры на водно-физические условия в почве и урожай растений // Бюлл. н/техн. инф. по агрон. физике, 1960, №7. С. 21-27.
3. Агролесомелиорация. М. Сельхозгиз. 1956. 511с. 1.
4. *Аксенов А.В.* Физико-механические свойства почв и энергетическое состояние почвенной влаги. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М. 2003. 24с.
5. *Алексеев Р.П.* Пути повышения эффективности полиакриламида на многонатриевом солонце // Научн. тр. Омского с/х ин-та, 1974, вып. 125. С. 38-51.
6. *Амирасланов К.З., Алиев Ч.А., Ковдышева Л.В.* Опыт применения некоторых полимерных препаратов в борьбе с ветровой эрозией почв на Апшероне // Вестн. с./х науки, 1973, №6. С. 31-35.
7. Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж. 2000. 412 с.
8. *Афлятдинов Ф.А.* Опыт применения нэрозина для закрепления и заращивания барханных песков на трассе газопровода Бухара-Урал. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1970. 30с
9. *Бамбалов Н.Н.* Баланс органического вещества торфяных почв и методы его изучения Минск.: Наука и техника, 1984, 175с.
10. *Безуглова О.С.* Удобрения и стимуляторы роста. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. 320 с.
11. *Березин П.Н.* Структурно-функциональные и гидрофизические свойства набухающих почв // Современные физические и химические методы исследования почв. М.МГУ, 1987. С.20-46.
12. *Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В.* Основные параметры и методы количественной оценки почвенной структуры // Почвоведение. 1985. № 10. С. 16-24.
13. *Белобров В.П., Замотаев И.В., Куленкамп А.Ю.* Проблемы «усталости» и деградации футбольных полей как биокосных почвенно-грунтовых тел. // В кн.: Природообустройство сельскохозяйственных территорий. Сб. матер.

науч-техн. конференции (24-25 апреля 2001 г.) М.: Изд-во ТСХА. 2001. С.38.
14. *Белобров В.П., Замотаев И.В., Куленкамп А.Ю.* Почвенные и техногенные процессы в искусственных рекреационных ландшафтах России // Доклады РАСХН. 2002, №2. С. 35-38.
15. *Белюченко И.С., Добрыднев Е.П., Муравьев Е.И.* Экологические особенности фосфогипса и целесообразность его использования в сельском хозяйстве // Сб. «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства». Краснодар. Изд-во КубГАУ, 2010. С. 13-23.
16. *Будников В.И.* Биотехнологические процессы в производстве мономеров // Вестник Пермского научного центра, 2009, №1. С. 16-22.
17. *Будников В.И., Синкин В.В., Стрельников В.Н.* Исследование водосорбционных характеристик наполненных акриловых сополимеров // Журнал прикладной химии, 2010. Т. 83, № 8. С. 1233-1408.
18. *Бондарев А.Г.* Теоретические основы и практика оптимизации физических условий и плодородия почв // Почвоведение, 1994, №11. С.35-42.
19. *Бондарев А.Г., Кузнецова И.В.* Физические основы повышения плодородия почв // Органическое вещество пахотных почв. Тр. Почвенного института им. Докучаева. М.: 1987 с.28-36.
20. *Бреслер Э., Макнил Б.Л., Картер Д.Л.* Солонцы и солончаки (принципы, динамика, моделирование). Л. Гидрометиздат. 1987.296с.
21. *Браунс Ф.Э., Браунс. Д.А.* Химия лигнина. М. Лесная пром-сть. 1964. 864с.
22. *Булгаков А.М.* Размещение, благоустройство и дренаж плоскостных спортивных сооружений Прибалтики. Рига: ЛАТНИИиТИ, 1979, 47 с.
23. *Булгаков А.М.* Строительство плоскостных спортивных сооружений. М.: Стройиздат. 1987. 209 с.
24. *Бутковский П.С.* Современная техника для выращивания качественных газонов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2001. №10. С. 41-44.

25. *Быков Б.А.* Экологический словарь Алма-Ата: Наука Казах.ССР, 1983, 216с.
26. *Быков В.И., Андронов С.А., Сержантов В.Г., Куркин Д.П.* Коплексное решение экологических проблем с помощью универсального природного минерала глауконита // 4-й Международный конгресс по управлению отходами «ВЭЙСТТЭК», 31 мая - 3 июня 2005 г., Москва, Россия: Материалы конгресса. М: ЗАО «Фирма СИБИКО Интернэшнл». С. 395-396.
27. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.*. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. – М.: Высшая школа. 1973. 399 с.
28. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.*. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Агропромиздат, 1986 416 с.
29. *Вайчис М.В.* Прогнозирование продуктивности сосновых насаждений по запасам гумуса и питательных элементов в почве // Тр. ЛитНИ ИЛХ. 1981. Вып.20. С.50-56.
30. *Вайчис М.В., Руткаускас А.Ю.* Запасы питательных веществ в почвах и их влияние на производительность сосновых и еловых лесов Литвы // Почвоведение. 1971. №2. С.79-93.
31. *хей-Вахба С.А.* К вопросу о применении полимеров для борьбы с ветровой эрозией. // Вестн. МГУ, сер. 17, почвоведение, 1980 №4. С.52-54.
32. *хей-Вахба С.А.* Влияние искусственных структурообразователей на механические и водные свойства песчаных почв. Автореф. канд. дисс., 1981. М. 26с.
33. *Вершинин П.В.* Почвенная структура и условия ее формирования. М-Л.: 1958., 186с.
34. *Вершинин П.В., Константинова В.П.* Физико-химические основы искусственной структуры почв. М.: Сельхозгиз, 1935. 180с.
35. Возможности современных и будущих фундаментальных исследований в почвоведении М. ГЕОС. 2000. 135 с.
36. *Вомперский С.Э.* Принципы оценки депонирования углерода болотами // Лесоведение, 1995, №5. С. 21-27.

37. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: МГУ, 198. 217с.
38. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.МГУ. 1984.204 с.
39. *Воронин А.Д.* Энергетическая концепция физического состояния почв. // Почвоведение, 1990, №5. С. 7-19.
40. *Вильямс В.Р.* Почвоведение М. Сельхозгиз. 1940. 448с.
41. *Гаель А.Г., Смирнова Л.Ф.* Пески и песчаные почвы. М. ГЕОС. 1999. 252 с. 1.
42. *Габай В.С.* Полиакриламид и закрепление подвижных песков // Вестн. с./х науки, 1965, №7. С. 10-16.
43. *Гедройц К.К.* Избранные сочинения, М.: Сельхозгиз, 1955.
44. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы. М.-Смоленск. Ойкумена. 2003. 268с.
45. *Глаголев М.В., Смагин А.В.* Приложения MATLAB для численных задач биологии, экологии и почвоведения. М.: Изд-во МГУ, 2005. 200с.
46. *Глобус А.М.* Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 428с.
47. *Гуссак В.Б.* Влияние гуминовых и полимерных препаратов на физические свойства почвы. // Сб. «Гуминовые и полимерные препараты в сельском хозяйстве» Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1961. С.52-76.
48. *Дилкова Р.* Продолжителност на ефекта от изкуствено оструторяване на излужена чернозем-смолница // Почвознание и агрохимия 1975, вып.10, №4. С.13-23.
49. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 260 с.
50. *Добровольский Г.В.* (ред.). Почва, город, экология. М: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.
51. *Дубровский С.А., Афанасьева М.В., Лагутина М.А., Казанский К.С.* Измерение набухания слабосшитых гидрогелей // ВМС, 1990, т.32. С. 165-170.
52. *Ефимов В.Н.* Торфяные почвы М.: РОССЕЛЬХОЗИЗДАТ. 1980. 120с.

53. Закон г. Москвы «О городских почвах» от 04.07.2007 № 31.
54. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв М.: МГУ,1987. 304с.
55. *Зайдельман Ф.*Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М.: КДУ, 2009. 720с.
56. *Зайдельман Ф.Р, Кожевин П.А., Шваров А.П, Павлова Е.Б., Горленко М.В.* Влияние разных способов пескования на биологическую активность и элементы газового режима осушенных торфяных почв // Почвоведение, 2001, №2. С. 234-244.
57. *Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П., Батраков А.С.* Изменение физических свойств осушенных торфяных почв после внесения песка разными способами //Почвоведение, 2005, №2. С. 218-231.
58. *Замотаев И.*В. Почвоподобные техногенные образования: свойства, процессы, функционирование. Автореферат. дисс…докт.геогр.наук. М.:ИГРАН. 2009, 50с.
59. *Замотаев И.*В., Белобров В.П. Технопедогенез на искусственных субстратах футбольных полей // Экологическое планирование и управление, №3, 2007. С. 48-63.
60. *Захаров Н.Г.* Новый способ закрепления подвижных песков М.: Сельхозгиз, 1954. 144с.
61. *Иванов А.П.* О механизме фиксации подвижной песчаной поверхности нефтепродуктами // Проблемы освоения пустынь, 1967. №2. 42с.
62. *Ильин В.В.* Биогенная и техногенная аккумуляция химических элементов в почве // Почвоведение, 1988, №7, с. 124-132.
63. *Ильинская С.А., Смагин А.В.* Роль почвы в экогенезе долинных сосновых лесов Подмосковья. // Лесоведение, 1989, №5. С.13-22.
64. *Казанский К.С., Ракова Г.В., Ениколопов Н.С.* Сильнонабухающие полимерные гидрогели как влагоудерживающие почвенные добавки // сб. «Природные ресурсы пустынь и их освоение» Ашхабад: Изд-во «Ылым», 1986. С.147-148.
65. *Карпачевский Л.О., Алябина И.О., Захарихина Л.В. и др.* Почвы Камчатки . М.: ГЕОС, 2009. 244 с.

66. *Качинский Н.А.* Проблема использования ВМС для оструктуривания почв // Вестн. Моск. Ун-та, 1962. Сер. VI, №4. С. 3-23.
67. *Качинский Н.А., Мосолова А.И., Таймуразова Л.Х.* Использование полимеров для оструктуривания почв // Почвоведение, 1967. №12. С. 98-106.
68. *Кин Б.А.* Физические свойства почвы. Л-М.: ГТТИ, 1933. 264с.
69. *Кирюшин В.И., Ганжара Н.Ф., Кауричев И.С., Орлов Д.С., Титлянова А.А., Фокин А.Д.* Концепция оптимизации режима органического вещества в почвах и агроландшафтах. М.: МСХА. 1993. 98с.
70. Классификация почв России. М., Почв. Ин-т им. В.В. Докучаева, 1997, 2004.
71. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука. 1985. 263с.
72. *Ковда В.А., Смагин А.В., Быстрицкая Т.Л.* Роль сезонной динамики органического вещества в самоорганизации степных биогеоценозов. // ДАН СССР, 1989, Т 308, №2. С.461-463.
73. *Кравков С.П.* Почвоведение М-Л.: Сельхозгиз, 1937. 500с.
74. *Кузнецова И.В.* Роль органического вещества в образовании водопрочной структуры дерново-подзолистых почв. // Почвоведение, 1994, №11. С.31-41.
75. *Кульман А.* Искусственные структурообразователи почвы. М.:Колос. 1982. 158с.
76. *Куценко Е.В.* Применение поликомплексов для закрепления подвижных песков и борьбы с дефляцией легких почв // Вестн. МГУ, сер. 17, почвоведение, 1981, №2. С.58-61.
77. *Лагутина М.А, Дубровский С.А.. Казанский К.С.* Набухание полиэлектролитных гидрогелей в условиях пространственных ограничений // ВМС, 1995. Т.37. С. 528-532.
78. *Лагутина М.А.* Давление набухания слабосшитых полимерных гидрогелей. Автореф. дисс. канд. физ-мат. наук. М. 1996. 22с.

79. *Лебедев А.Ф.* Почвенные и грунтовые воды. М.: Изд-во АН СССР, 1936. 316с.
80. *Масленкова Г.Л.* О механизме искусственного структурообразования // Почвоведение, 1961, №11. С. 31-36.
81. *Межлас Г.В.* Образование гумусового горизонта и продуктивность восстановленных почв // Тез. докл. 8 Вс. съезда почвоведов. Новосибирск. 1989. Кн.4. С.193.
82. *Мигунова Е.С.* Леса и лесные земли. М. Экология. 1993. 364с.
83. *Минеев В.Г.* Агрохимия. М. МГУ, 1990. 485 с.
84. *Мироненко Е.В., Салимгареева О.А., Понизовский А.А., Чудинова С.М.* Влияние гидрофобных жидкостей на водоудерживание и энергетическое состояние воды в почвах // Почвоведение, 2000, №4. С. 463-470.
85. *Михайлина В.И.* Меры борьбы с ветровой эрозией в США // Растениеводство, 1973, №6. С.31-38.
86. *Мищенко А.А., Бреус И.П., Неклюдов С.А., Бреус В.А.* Сорбционное взаимодействие экзогенных углеводородов с компонентами почвенно-растительных систем // Доклады РАСХН, 2003, №6. С. 16-19.
87. *Молчанов А.А.* Гидрологическая роль леса М.: Изд-во АН СССР, 1960. 488 с.
88. Москва: геология и город. Под ред. Осипова В.И. и Медведева О.П. М.: АО «Московские учебники и картолитография». 1997. 400 с.
89. *Мосолова А.И., Уткаева В.Ф.* Длительность действия полимерных препаратов при закреплении почвогрунтов применительно к засыпкам дренажных траншей// Вестн. МГУ, сер. 17, почвоведение, 1977, №2. С.31-35.
90. *Мосолова А.И.* Влияние полимеров на структуру дерново-подзолистых почв и урожай сельскохозяйстивенных культур // Почвоведение, 1970, №9. С.54-64.
91. *Мосолова А.И.* Опыт искусственного оструктуривания почвы с помощью полимеров // Вестн. Моск. Ун-та, 1964. Сер. VI. №2. С. 15-24.
92. *Нурыев Б.Н., Мирошник Л.С., Дубровский С.А., Казанский К.С.* Факторы, определяющие влагоемкость Каракумского песка под влиянием гидрогелей. Ашхабад:Изд-во «Ылым», 1986. 62с.

93. *Онищенко В.Г.* Влияние органического вещества на влагопроводность почв // Тез. докл. II Съезда РОП, Санкт-Петербург, 1996, кн.1.С.99.
94. *Онюнас В.В.* Качественный состав гумуса и продуктивность сосновых насаждений // Современные исследования продуктивности и рубок леса. Каунас. 1976. С.207-211.
95. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.МГУ. 1985.376с.
96. *Паганяс К.С.* Искусственная структура, функциональные свойства и урожай хлопчатника. Ташкент: ФАН. Уз.ССР, 1972. 365с.
97. *Паулюкявичюс Г.Б.* Гидрологические и геохимические свойства холмистых лесных ландшафтов. Вильнюс. 1972. 460с.
98. *Пакшина С.М., Есафова Е.Н., Сапожников П.М., Матрошилов Ю.А.* Влияние гидрофобных прослоек на испарение воды и перенос солей в южном черноземе // Вестн. МГУ, сер. 17, почвоведение, 1981, №2. С.46-50.
99. *Петров В.И., Рогачев В.П.* Опыт и перспективы применения сильнонабухающих полимерных гидрогелей (СПГ) в аридной зоне // Тез. докл II Вс. совещ. «Биологически активные полимеры и полимерные реагенты для растениеводства». Звенигород, 1991. С.34.
100. *Плешиков Ф.И.* Лесорастительные свойства почв ленточных боров Минусинской котловины и их относительная оценка. Автореферат канд . дисс., Красноярск, 1975. 20с.
101. *Полякова Г.А., Гутников В.А.* Парки Москвы: экология и флористическая характеристика. М.: ГЕОС,2000. 406с.
102. Постановление Правительства Москвы «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве» от 27.07.04 № 514-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 09.08.05 № 594-ПП).
103. Постановление Правительства Москвы «Об утверждении норм и правил проектирования комплексного благоустройства на территории г. Москвы; МГСН 1.02-02» 06.08. 2002 г. № 623-ПП.
104. Постановление Правительства Москвы «Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений

г.Москвы» от 10.09. 2002 г. № 743-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 11.05.2010 № 386-ПП).
105. Почвенно-агрономическая характеристика АБС Чашниково 1986. Ч. 1. 96с.
106. Программа и методика биогеоценологических исследований М.: Наука, 1974. 404с
107. *Пронина Н.Д., Краснобаева Н.Н., Кудрявцева Н.Н., Черканова Н.Н., Урманцев Ю.А., Казанский К.С.* Действие сильнонабухающих полимерных гидрогелей на растения сои и люцерны в условиях засухи // Тез. докл II Вс. совещ. «Биологически активные полимеры и полимерные реагенты для растениеводства». Звенигород, 1991. С.29.
108. *Растворова О.Г., Романов О.В., Макарова Н.Л.* Изменение физических свойств почв при их экспериментальной дегумификации // Тез Вс. съезда почвоведов. Новосибирск. 1989. кн.1 с. 112.
109. *Ревут И.Б., Ионавикус А.А., Масленкова Г.Л.* О некоторых направлениях примепнения полимеров в земледелии // Сб. тр. агрон. физики. 1969, №19. С. 95-103
110. *Ревут И.Б., Масленкова Г.Л., Романов И.А.* Химические способы воздействия на испарение и эрозию почвы. Л.:Гидрометеоиздат, 1973. 150с.
111. *Роде А.А.* Почвообразовательный процесс и эволюция почв. М.: ОГИЗ, 1947.142 с.
112. *Роде. А.А.* Почвенная влага. М. Изд-во АНСССР. 1952. 456с.
113. *Романов И.А.* Применение полиакриламида для улучшения физических свойств почвы // Бюлл. НТИ по агроном. физике, 1960, вып. 8-9. С. 74-78.
114. *Ремезов Н.П., Быкова Л.Н., Смирнова К.М.* Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М. МГУ. 1959. 284с.
115. *Рыдкин Ю.И.* Почвенно-мелиоративные изыскания, составление карты и обоснование мелиоративного проекта. М.МГУ, ф-т почвоведения. 1993, 40с.
116. *Рысин Л.П.* Сложные боры Подмосковья М.Наука. 1969. 110с.

117. *Рысин Л.П.* Типы леса Серебряноборского опытного лесничества // Природа Серебряноборского лесничества. М. Наука. 1974. С. 173-221.
118. *Садовникова Н.Б., Смагин А.В.* Использование сильнонабухающих полимерных гидрогелей в почвенном конструировании // Сб. Тез. XII Всеросс. конф. «Структура и динамика молекулярных систем», Яльчик, 2005. Иошкар-Ола-Уфа-Казань-Москва. 2005. С.185.
119. *Сапожников П.М.* Связь набухания некоторых типов почв с категориями удельной поверхности и энергетикой почвенной влаги // Почвоведение, 1985, №3. С.40-45.
120. *Сапожников П.М.* Физические параметры плодородия почв при антропогенных воздействиях. Автореф. дисс. д-ра с/х. наук. М. 1994. 48с.
121. *Сапожников П.М., Уткаева В.Ф., Васенев И.И.* Оценка изменения физических свойств черноземов при орошении // Почвоведение, 1992, №11. С.43-54.
122. *Сахаров М.И.* Органический отпад в лесных фитоценозах // Почвоведение,.1939. №10.С. 17-24.
123. *Смагин А.В.* Почва как результат самоорганизации биогеоценоза. // ДАН СССР, 1989, Т. 308, №3, С.729-731.
124. *Смагин А.В., Савельев А.А., Смагина М.В.* Организация песчаных почв сосновых БГЦ (уровень системы почвенных горизонтов) // Почвоведение, 1992, №9. С.120-130.
125. *Смагин А.В.* Агрегатный уровень организации песчаных почв сосновых БГЦ // Почвоведение, 1993, №6. С.16-23.
126. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б.* Влияние сильнонабухающих полимерных гидрогелей на водоудерживающую способность легких почв // Почвоведение, 1994, №11.С.50-55.
127. *Смагин А.В.* Линейный анализ неустойчивости фронта впитывания как причины преимущественных потоков в однородной пористой среде // в сб. «Лизиметрические исследования почв». М. МГУ, 1998. С. 176-181.
128. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бен-Али.* Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение, 1998, №11. С.1362-1370.

129. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Хайдапова Д.Д., Шевченко Е.М.* Экологическая оценка биофизического состояния почв. М.МГУ. 1999. 48с.
130. *Смагин А.В., Губер А.К., Шеин Е.В., Мунир Гайз.* Разработка почвенных конструкций и режимов орошения озеленяемых городских ландшафтов в условиях аридного климата // в сб. «Деградация почв и опустынивание» М. МГУ. 1999. С. 470-482.
131. *Смагин А.В.* Распределенные кинетические модели органопрофиля почв. // Вестн. Моск. Ун-та. 2001. Сер. 17, почвоведение. №3. С. 3-7.
132. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б, Смагина М.В., Глаголев М.В. и др.* Моделирование динамики органического вещества почв. М.: Изд-во МГУ, 2001. 120с.
133. *Смагин А.В.* Теория и методы оценки физического состояния почв. // Почвоведение. 2003 №3. С.328-341.
134. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Назарова Т.В., Кирюшова А.Б., Машика А.В., Еремина А.М.* Влияние органического вещества на водоудерживающую способность почв // Почвоведение, 2004, №3. С.1-10.
135. *Смагин А.В.* Основные требования и применяемые технологии при создании плодородного слоя почв при проведении земляных работ в ходе создания и реконструкции объектов благоустройства // Городские почвы: проблемы и решения. М.: НИиПИЭГ. «Прима Пресс», 2004.
136. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: МГУ, 2005. 301с.
137. *Смагин* А.В. Почвенно-гидрологические константы – миф или реальность? // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации М.МГУ. 2005. С.247-251
138. *Смагин А.В.* Рукотворные почвы аридных регионов // ж. Наука в России, №6, 2006, с.53-58.
139. *Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В. и др.* Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // ж. Почвоведение, 2006, №5, с. 603-615
140. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Глаголев М.В., Кириченко А.В.* Новые инструментальные методы и портативные электронные средства контроля экологического

состояния почв и сопредельных сред // Экологический Вестник Сев. Кавказа, 2006. т. 2, №1, с. 5-17.
141. *Смагин А.В.* Триггерные модели организации лесных экосистем на песчаных почвах // Лесоведение, 2007, №5. С. 51-59.
142. *Смагин А.В.* Методологические подходы к построению математических моделей структурно-функциональной организации почв // «Роль почв в биосфере»: Тр. Ин-та экологического почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова. - М.: Изд. Ин-та экологического почвоведения МГУ. М.: МАКС Пресс, 2007. Вып. 7. Экология почв . Почвенные ресурсы. Модели почвообразования. С. 126-176.
143. *Смагин А.В.* Почвенно-гидрофизическое обеспечение исследований газовой функции западносибирских болот в связи с проблемой парникового эффекта // Экологический Вестник Сев. Кавказа, 2007, т.3, №3. С.46-58.
144. *Смагин А.В., Смагина М.В., Садовникова Н.Б.* Методологические аспекты оценки биологической активности лесных грубодисперсных почв в условиях антропогенной нагрузки. // Экологический Вестник Сев. Кавказа, 2007, т.3, №2. С.72-88.
145. *Смагин А.В., Прусак А.В.* Влияние копролитов червей на основную гидрофизическую характеристику почв // Почвоведение, 2008, №6. С.1-5.
146. *Смагин А.В., Смагина М.В.* Потенциальная биологическая активность почв легкого гранулометрического состава в условиях рекреационного лесопользования // Влияние рекреации на лесные биогеоценозы Тула: Гриф и К 2008, с. 257-285 (раздел монографии).
147. *Смагин А.В., Шоба С.А., Макаров О.А.* Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства (на примере г. Москвы). М.: Изд-во МГУ, 2008. 360с.
148. *Смагин А.В., Хакимова Г.М., Хинеева Д.А., Садовникова Н.Б.* Гравитационный фактор формирования наименьшей и капиллярной влагоемкости в почвах и слоистых почвенных конструкциях // Почвоведение, 2008, №11. С.60-69.

149. *Смагин А.В.* Экспериментальная оценка энергетических показателей молекулярных взаимодействий в почвах // Коллоидн. журн., 2008, т.70, № 4. С.515-519.
150. *Смагин А.В.* Как врачевать городские почвы // Наука в России, 2009, №3, с. 27-34.
151. *Смагин А.В.* Моделирование естественной и антропогенной динамики черноземов // Экологический вестн. Сев. Кавказа, 2009, т.5. №4. С. 5-17.
152. *Смагин А.В., Шоба, С.А., Садовникова Н.Б.,. Кириченко А.В, Кинжаев Р.Р, Карева О.В.* Влагоаккумулятивные почвенные конструкции: теория, эксперимент, практика // сб. Агроэкологические проблемы состояния почв нечерноземной зоны и пути их решения. 2009, М.: Экстра-Принт. С. 118-130.
153. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б.* Влияниие сильнонабухающих полимерных гидрогелей на физическое состояние почв легкого гранулометрического состава М.:МАКС Пресс, 2009. 208с.
154. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.Э., Шнырев Н.А.* Абиотические факторы дыхания почв // Экологический Вестник Сев. Кавказа, 2010. т. 6. №1, с. 5-14.
155. *Смагин А.В., Богатырев Л.Г., Воронина М.М.* Об инвариантности зоны трансформации органического вещества почвы // Сб. Инновации: Экология, 2010. М.: МАХ Press. С. 97-99.
156. *Смагин А.В* Моделирование гидрологической функции лесной подстилки // Экологический Вестник Сев. Кавказа, 2011. т. 7. №1, с. 10-20.
157. *Сметанин В.И* Рекультивация и обустройство нарушенных земель. М.:Колос, 2000. 95с.
158. *Смольникова В.В.* Особенности культивирования дождевых червей в условиях нефтяного загрязнения // Экологический Вестник Сев. Кавказа, 2010. т. 6. №1, с. 48-51.
159. *Сорокина Н.П., Когут Б.М.* Динамика содержания гумуса в пахотных черноземах и подходы к ее описанию // Почвоведение, 1992, №2. с.178-184.
160. *Стрельников В.Н., Будников В.И., Синкин В.В.* Полимерный гидрогель в технологии орошения почв // Аграрная наука. 2007. № 10. С. 18-19.

161. *Строганова М.Н., Мягкова А.Д. Прокофьева Т.В.* Роль почв в городских экосистемах // Почвоведение, 1997, №2. с.96-101.
162. *Судницын И.И.* Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М. МГУ. 1979. 254с.
163. *Судницын И.И.* Экологическая гидрофизика почв. М. МГУ. 1995. 80 с.
164. *Судницын И.И., Зайцева Р.И.* О методах определения зависимости давления почвенной влаги от влажности // Вестн. МГУ, сер. 17, 1993, №2. С. 18-24.
165. *Судницына Т.Н.* Особенности почвенного питания древостоев сложных сосняков в связи с составом пород // Пространственная структура сложных сосняков. М.Наука. 1987. С.42-56.
166. Теории и методы физики почв М.: Гриф и К. 2007, 616с.
167. *Травникова Л.С.* Влияние поселения липы под пологом сосняка дубнякового на свойства почвы // Тр. Воронежский гос. зап.1959. Вып. 8. С. 264-267.
168. *Трибис В.П.* Оценка скорости минерализации органического вещества торфяных почв // Почвоведение, 1990, №2. С.105-110.
169. *Трофименко Ю.В., Евгеньев Г.И.* Экология: транспортное сооружение и окружающая среда. М.:Изд. центр «Академия», 2006. 400с.
170. Физические условия почвы и растение. М. Изд-во Ин. Лит-ры. 1955. 568с.
171. *Финкельштейн З.И., Козырева Л.П., Головлева Л.А.* Биоремидиация почв загрязненных симацином и феноксиалкановыми гербицидами. Биотехнология защиты окружающей среды. (Тез. докл. конф. 18-19 октября 1994 г.). - Пущино, 1994. с.28.
172. *Хан. Д.В.* Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 142 с.
173. *Хильми Г.Ф.* Биогенные превращения энергии и их экологическое значение // Проблемы оптимизации в экологии М. Наука 1978 . С.159-175.
174. *Холявко В.С., Глоба-Михайленко Д.А.* Дендрология и основы зеленого строительства. М. Высшая школа, 1980. 248с.

175. *Шевелуха В.С.* Рост растений и его регуляция в онтогенезе. М.: Колос, 1992. 600 с.
176. *Шеин Е.В.* Курс физики почв М.: МГУ, 2005. 432 с.
177. *Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Губер А.К.* Педотрансфункции: получение, обоснование, использование // Почвоведение, 1999, №11. С.1323-1331.
178. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов. //Почвоведение, 2003, №1. С.53-61.
179. Экологические требования к орошению почв России. РАСХН, 1996 72с.
180. Экологические функции городских почв. М.-Смоленск: Маджента, 2004. 230 с.
181. *Adams W.A., Jones R.L.* The effect of particles size composition and root binding on the resistance to shear of sports turf surface // Rasen, Turf, Gazon. 1979. №2. P. 48-68.
182. *Al-Darby A.M.* The Hydraulic Properties of a Sandy Soil Treated with Gel-forming Soil Conditioner // Soil Technology, 1996, v.9 (1-2).P.15-28.
183. *Azzam R.* Tailoring Polymeric Gels for Soil Reclamation and Hydroponics // Commun/ in Soil Sci. Plamt Anal. 1985, vol.16, №10. P.1123-1138.
184. *Baker S.W.* Criteria in topsoil selection for sports turf // Agr. Engr. 1990 V.45. №3. P. 87-88.
185. *Barcroft A.* Superabsorbents improve Plant Survival // World crops, 1984, №1-2. P. 7-10. Bauen mit Gruen: die Bau- und Vegetationstechnik des Landschafts und Sportplatzbaus. Berlin, Hamburg: Parey, 1989. 436 s.
186. Bauen mit Gruen: die Bau- und Vegetationstechnik des Landschafts und Sportplatzbaus. Berlin, Hamburg: Parey, 1989. 436 s.
187. *de Boodt M.* Increasing production through efficient use of soil water in arid zones // Trans. 13 Congr. Int. Soc. Soil Sci., Hamburg, 1986, v.2. P.30.
188. *Bridges E.M., Batjes N.H.* Soil gaseous emissions and global climate change // Geography, 1996, V.81(2). P. 155-169. 1.
189. *Campbell G.S.* Soil Physics with BASIC. Elsevier Sci., 1985. 268 p.

190. *van Deventer P.W.* Contradicting approaches to the establishment and construction of sports fields. // First Int.Conf. on soils of urban, industrial, traffic and mining areas. V.II. Application of soil information University of Essen, Germany, 2000. P.541-542
191. *Dexter A.R.* Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth // Geoderma, 2004, v. 120. P. 201-214.
192. *Dexter A.R.* Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting // Geoderma, 2004, v. 120. P. 215-225.
193. *Dexter A.R.* Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory // Geoderma, 2004, v. 120. P. 227-239.
194. Diagnose und Therapie-handbuch fur Rasenkrankheiten // Eurogreen. Grun-System, 1996. 42 s.
195. *El-Haddy O.A., Tayel M.Y.* The potentiality for increasing plant available water in sandy soils using PAM-G2 // Egypt J. Soil Sci., 1983, v.23, №3. P. 243-257.
196. *Emerson W.W.* Synthetic soil conditioners // J. Agr. Sci. 1956, №1, v.47. P. 117-121.
197. *van Genuchten M.T.* A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci Soc. Am. J., 1980, v.44. P.892-898.
198. *Gupta S.C., Larson W.E.* Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density // Water Resour. Res., 1979, v.15. P 1633-1635.
199. *Holmes R.M., Toth S.J.* Physico-chemical behavior of clay-conditioner complexes // Soil Sci., 1957, v.84, №6. P. 479-488.
200. *John E.A.* Sand dune erosion control at Provincetown, Massaschusets // J. Soil and Water Concerv. 1965, v.20, № 4. P.189-191
201. *Johnson M.S.* Effect of Soluble Salts on Water Absorption by Gel-forming Soil Conditioners // J/ Sci. Food Agric., 1984, vol.35. P. 1063-1066.
202. *Johnson M.S.* The effects of Gel-forming Polyacrylamides on Moisture Storage in Sandy Soils // J. Sci. Food Agric. 1984, vol. 35. P. 1196-1200.

203. *Knobloch H.* Styromull ein Filterstoff // Wasser und Boden, 1966, vol. 12, №18. P.415-418.
204. *Krupka B.* Dachbegruennung: Pflanzen- und Vegetationsanwendung an Bauwerken. Handbuch des Landschaftsbaus. Stuttgart: Verlag, 1992. 67 s.
205. *Kullman A., Benkenstein H.* Orgqnische Gele zur nachhaltigen Verbessering physikaliscer und physikalisch-chemischer Eigenschaften von Boden und Substraten // Arch. Gartenbau, 1987, vol.35, №6/H. P. 269-272.
206. *Lehr R.* Taschenbuch fuer den Garten- Landschafts- und Sportplatzbaus. Berlin: Parey Buchverlag, 1997. 952 s.
207. *Letey J.* Relationship between soil physical properties and crop production // Advances in Soil Sci. Springer-Verlag N.Y. 1985. P.277-294.
208. *Liesecke H.-J., Krupka B., Loesken G., Brueggeman H.* Grudlagen der Dachbegruenung. Berlin-Hannover: Verlag, 1989. 56 s.
209. *Loesken G.* Technisch – konstruktive Grundlagen der Freiraunplanung Dachbegruenung. Arbeitsmateriailen fuer die Vorlesung Wintersemester 2004/2005. Universitaet Hannover, 2005. 21 s.
210. *Maas E.V., Hoffman G.J.* Crop-salt tolerance evaluation of existing data // J. Irrig. Drain. Div., 1977, v.103. P.115-134.
211. *Matthias C.G.* Praxis des Sportplatzbaus. Fehleraufdeckung und vermeidung. Renningen-Malmsheim: Verlag, 2002. 38 s.
212. Materials of 2th International Symposium on Arid Grow in Bahrain. ED. by prof. Andrey Smagin @ Andrey Doljich (MSU, UNEPCOM). Moscow-Manama: MSU-UNEPCOM. 2007. 68 p.
213. *Mualem Y.* A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res., 1976, v.12. P. 513-522.
214. *Nielsen D.R., Don Kirkham, Phillips R.E.* Synthetic soil conditioners in Iowa // Iowa Farm.Sci., 1959. vol. 13, №8. P.8-10.
215. PRESTO Products Company «Technical Literature on the Geoweb Cellular Confinement System», 1985 – 1995 // http://www.presto.ru/.
216. *Reda A., Azzam R.* Radiation Preparation and Grafting of Ampholyte Acrilonitrile Base Terpolymer on Cellulosic Substrate

for Soil Reclamation and Amelioration // 5-th Symp. on Radiation Chemistry, Cair, Egypt. 1982. P. 771-777.
217. *Shirazi M.A., Boersma L., Hart J.W.* A unifying quantitative analysis of soil texture // Soil Sci. of Am., 1998, V.52. P.181-190.
218. *Smagin A.V., Shoba S.A., Kinjaev R.R. et al.* Arid Grow-Ideal Soil System. M-Manama. MSU-press. 2005. 144p.
219. *Smagin A.V., Bogatyrev L.G., Basevich V.F.* Experimental research of evapotranspiration of lawn grasses for grounding of irrigation cycles in arid conditions // Proc. of the Second Int. Symposium on Technology of Sustainable Irrigation Farming «Arid Grow» in 2007. The Kingdom of Bahrain, Manama: ISPC UNEPCOM 2007, p. 31-36.
220. *Smagin A.V., Sadovnikova N.B.* Soil constructions and technologies for stable effective farming under arid conditions // Abstr. of 18-th Wjrld Congress of Soil Science, 2006 – Philadelphia, Pennsylvania, USA V.3, p. 75.
221. *Smagin A.V.* Physically based mathematical models of the water vapor sorption by soils // Eurasian Soil Science, 2011, V. 44, №6, P. 659-669.
222. Sportrasenpflege. DEULA Rheinland Kempen. 2006. 18 s.
223. *Tayel M.Y., El-Hady O.A.* Soper Gel as a Soil Conditioner // Egypt. J. Soil. Sci. Spec.Issue. 1981. P.103-106.
224. *Wesseling J.G.* Soil physical data and modeling moisture flow. Alterra, Wageningen UR, 2009. 178 p.

Интернет-сайты:

http://www.geoterra.ru/gabions.htm
http://www.hydrus2d.com/
http://mosgeoplan-proekt.ru/
http://www.presto.ru/
http://saprex.ru/

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЦВЕТНЫЕ ИЛЛЮСТРАЦИИ
К МОНОГРАФИИ «ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЧВ»

Фото 1. Внешний вид московских газонов с регулярным поливом (возле мечети) и без орошения (муниципальные территории вдоль Минской ул.) засушливым летом 2010 г.

Фото 2. Влияние сенокошения на состояние городской газонной растительности в засушливые периоды (Москва: Крылатское).

Фото 3. Стадии деградации газона при биодеструкции растительного грунта (Москва: Крылатское, Ломоносовский проспект).

Фото 4. Гибель растительности на почвенных конструкциях типа «газонные решетки» из-за недостатка влаги (Москва: Крылатское, Куркино).

Фото 5. Отмирание крупномеров за 3 года после «посадки комом» из-за недоразвитости корневых систем и недостатка влаги во время засух (Москва: Крылатское).

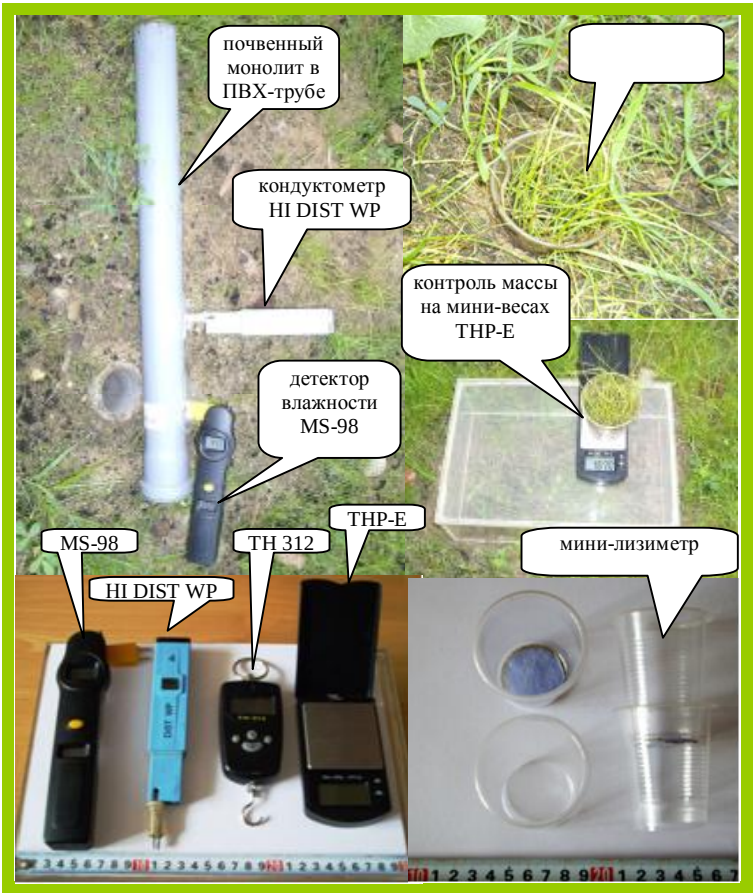


Фото 6. Полевое оборудование для мониторинга водно-воздушного и солевого режимов почв и почвенных конструкций (НИОКР по Проекту Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10 «Разработка технологии почвенного конструирования для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой», г. Москва, 2010 г)

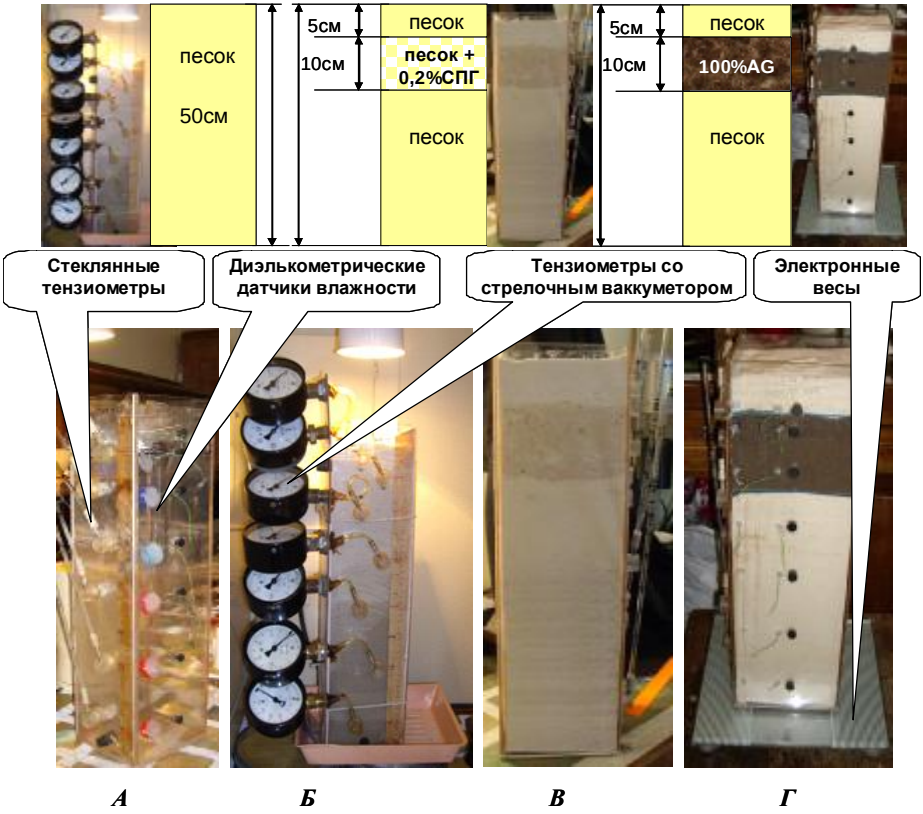


Фото. 7. Макеты распределенных почвенных конструкций для лабораторных исследований: А – колонна из оргстекла с диэлькометрическими датчиками влажности и стеклянными тензиометрами, Б – контрольный образец (гомогенный кварцевый песок) со стрелочными тензиометрами (ваккуметрами) в лотке для сбора инфильтрата, В – конструкция с 10 см слоем 0,2%СПГ в песке, Г – конструкция с 10см слоем органогенного почвомодификатора «Arid Grow» на платформе для взвешивания (электорнные напольные весы LAICA (КНР) 5-100 кг, точность 10 г). Вверху – схемы макетов почвенных конструкций малого размера.

Фото 8. Развитие «фингер-эффекта» в слоистых конструкциях при напорном впитывании влаги.

Фото 9. Развитие всходов газонной смеси в макетах слоистых почвенных конструкций на 14-е сутки после посева семенами.

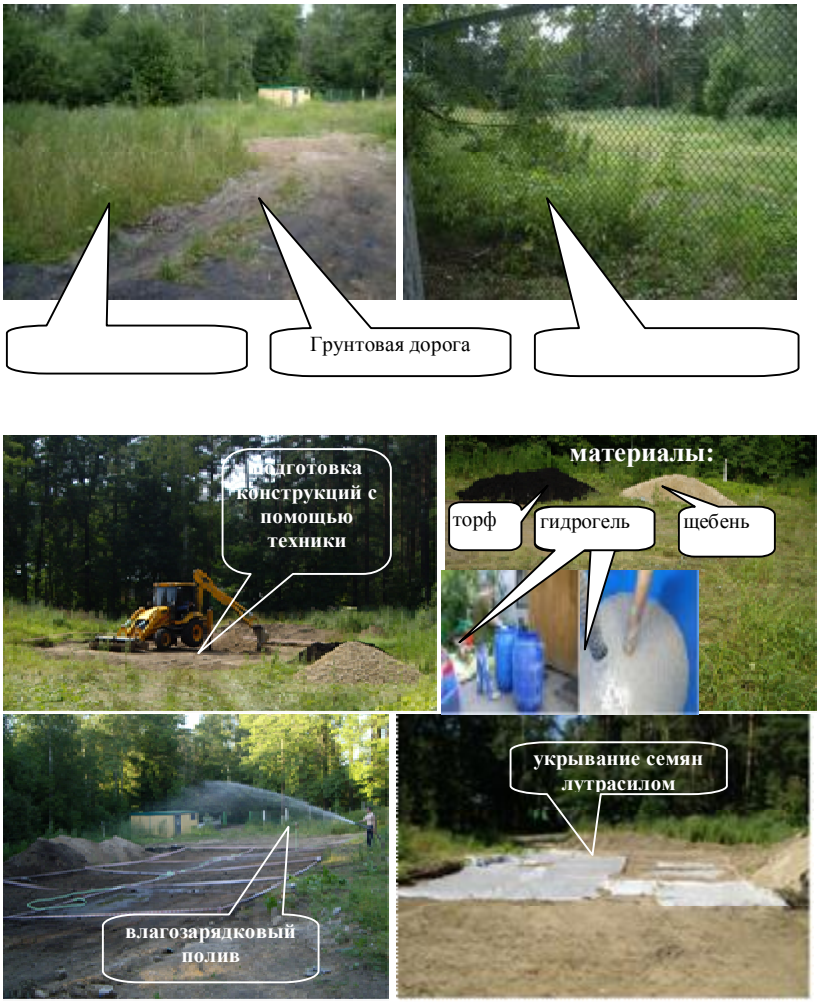


Фото 10. Первоначальное состояние опытного участка в ЗАО (ул. Крылатская, Серебряноборское л-во ИЛ РАН) и технологические этапы подготовки почвенных конструкций (НИОКР по Проекту Госконтракта ПМ № 8/3-66н-10 «Разработка технологии почвенного конструирования для озеленения и благоустройства территорий с высокой антропогенной нагрузкой», г. Москва, 2010 г)

Фото 11. Опытные площадки по тестированию сплошных почвенных конструкций в королевстве Бахрейн (травянистая культура –люцерна).

Фото 12. Конструирование и эффективность противосолевых экранов при выращивании газонной растительности (Катар, станция Аль-Джазия, по [Смагин, 2006, Smagin et al., 2005]).

Фото 13. Эксперимент с технологией почвенного конструирования на малых площадках вдоль автомагистрали (Мичуринский пр-т).

Фото 14. Визуальная оценка состояния опытных участков в эксперименте по тестированию почвенных конструкций в алидных условиях (О.А.Э., Дубаи, 1995).

Фото 15. Урожай в эксперименте по тестированию локальных почвенных конструкций на основе российского почвомодификатора «AridGrow» в аридных условиях (Иордания, 2008г).

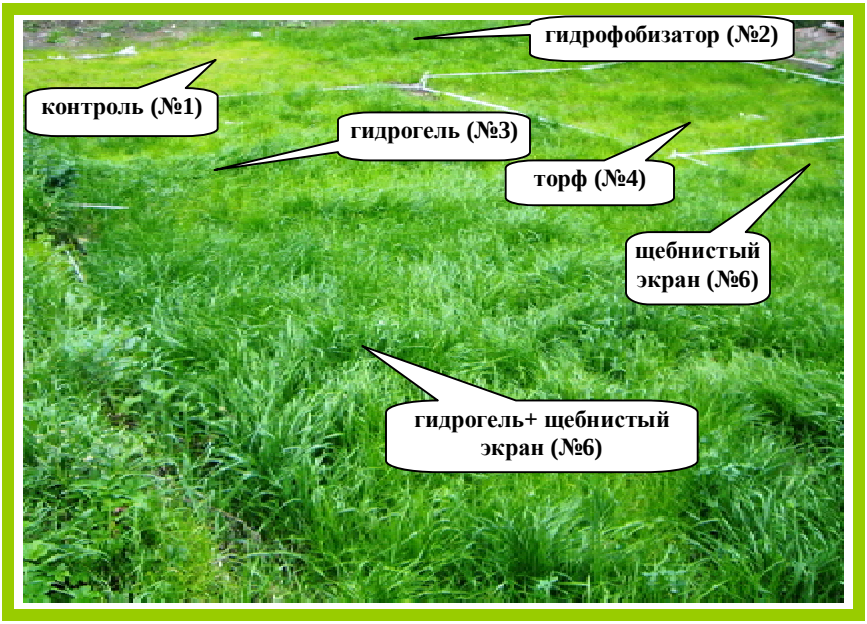


Фото 16. Внешний вид основного объекта для тестирования слоистых почвенных конструкций в условиях столичного мегаполиса (ЗАО, ул. Крылатская, Серебряноборское л-во ИЛ РАН, 29.08.2010 г).

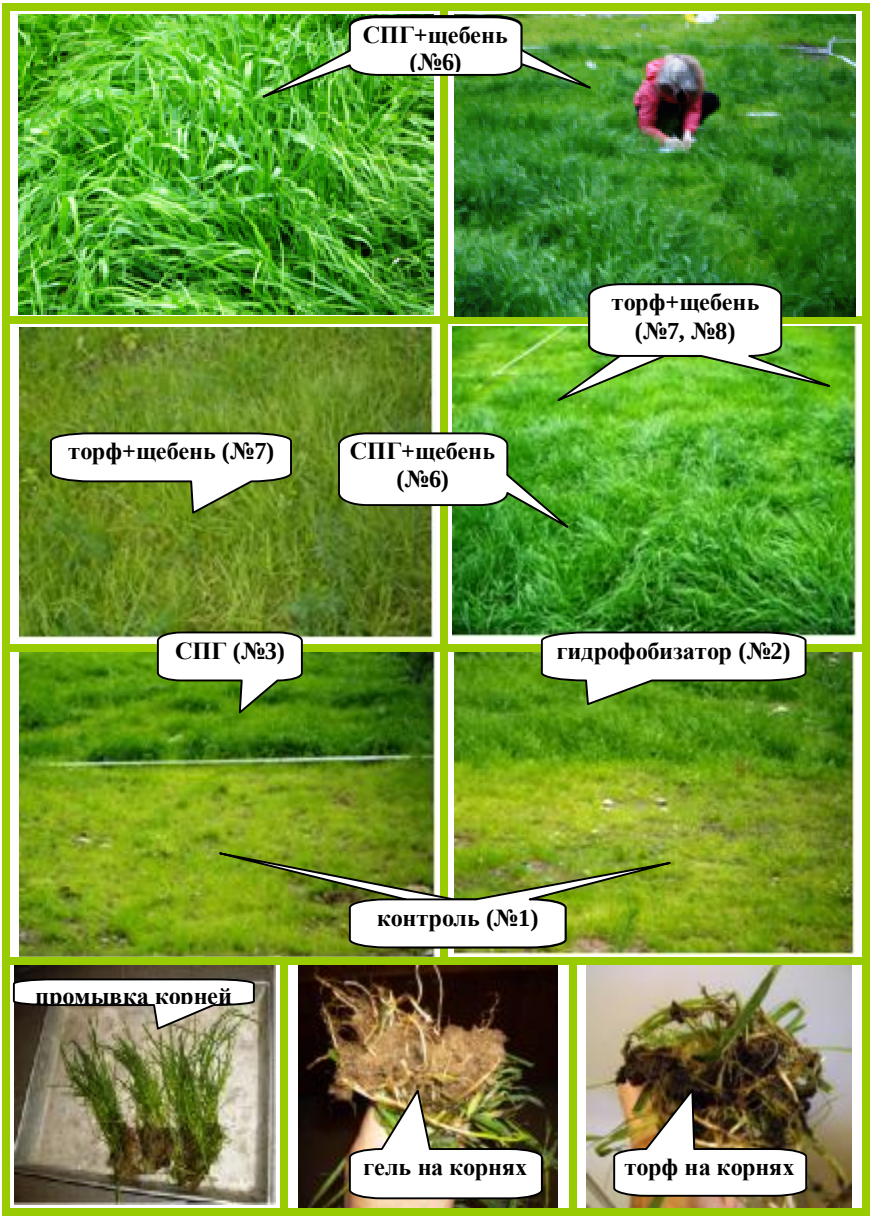


Фото 17. Сравнительный анализ внешнего состояния отдельных вариантов почвенных конструкций (ЗАО, ул. Крылатская, Серебряноборское л-во ИЛ РАН, 29.08.2010 г).

Научное издание

Смагин Андрей Валентинович

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЧВ

Редактор А. С. *Бобарыкин*
Иллюстрации выполнены в авторской редакции
Художник *В.* А. *Чернецов*
Художественный редактор *Ю.М.Добрянская*

Подписано в печать 22.05.2012
Формат 60x90/16. Бумага офс. № 1.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 34,0 +цв. вкл. (0,75 п. л.).
Тираж 250 экз.
Изд. №9618. Заказ № 1911.

Ордена «Знак Почета»
Издательство Московского университета
125009, Москва, ул. Б. Никитская 5/7.
Тел.: 629-50-91. Факс: 697-66-71
939-34-93 (отдел реализации)
E-mail: secretary-msu-press@yandex.ru

Сайт Издательства МГУ:
www.msu.ru/depts/MSUPubl2005
Интернет-магазин: http://msupublishing.ru

Отпечатано в Типографии МГУ.
119992, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Смагин Андрей Валентинович, 1965 г.р., окончил с отличием ф-т почвоведения в 1987 г и по завершении конкурсной аспирантуры со стажировкой в США (1990) стал сотрудником, с 1994 – доцентом, а с 2004 по н/в – профессором кафедры физики и мелиорации почв по ректорской программе «100+100». Имеет ученую степень д.б.н. (2004) и ученое звание профессора (2007). За время работы зарекомендовал себя как высококвалифицированный, талантливый, разносторонний ученый и преподаватель. Он активно участвовал в НИР ф-та почвоведения МГУ, а также ин-та Экологического почвоведения МГУ, где по совместительству до 2015 г возглавлял лабораторию круговорота веществ и потоков энергии в педосфере. Является автором и соавтором более 300 научных публикаций, среди которых 20 монографий («Моделирование динамики органического вещества почв, Изд-во Моск. Ун-та, 2001, 120 с.», «Газовая фаза почв», Изд-во Моск. Ун-та, 2005, 301с., «Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства» М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2008, 300 с., «Теория и практика конструирования почв» М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2012, 544 с., «Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах» СПб.: Наука, 2014, 270 с. и др.), 17 учебно-методических пособий и 240 научных статей в отечественных и зарубежных изданиях. Развивает фундаментальное биогеофизическое направление, рассматривающее на количественном уровне процессы и модели природной и антропогенной организации динамических биокосных систем. Основные научные достижения: термодинамическая теория физического состояния почв, включая концепцию конкурентных молекулярных межфазных взаимодействий и биогенной физической организации (2003, 2004, 2016, 2018, 2019), кинетические модели динамики органического вещества и почводинамики, включая нелинейные триггерные модели роста в зависимости от эдафических факторов (2007, 2012) и распределенные модели динамики черноземов (2010, 2018), учение о газовой фазе и экологической газовой функции почв (2000, 2005, 2009, 2011, 2014, 2017), включая термодинамические и кинетические модели межфазных взаимодействий, транспорта и биогенных источников/стоков в почвах и грунтах, ресурсный подход к экологической оценке и нормированию качества городских почв (2009, 2017), система критериев и нормативов почвенных режимов функционирования (2006, 2017), инструментальные методы оценки межфазных взаимодействий, феноменологических показателей энергомассопереноса, биологической активности, экологического мониторинга почвенных режимов (1991, 1998, 2005, 2007, 2009, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019 , технологии почвенного конструирования (2005, 2009, 2012, 2016-2020).

Автор лекционных курсов «Газовая фаза почв», «Биогеофизика», «Общая экология», «Геоэкология», «Моделирование газовой динамики в почвах и ландшафтах». Член Центрального совета Докучаевского общества почвоведов, Ученого совета ИЭП МГУ, Диссертационного совета ф-та почвоведения МГУ, редколлегий ж. «Экологический вестник Северного Кавказа» (зам. Главного редактора), «Доклады по экологическому почвоведению», рецензент многих отечественных и зарубежных (группа MDPI) изданий. Руководитель и ответственный исполнитель более 30 исследовательских проектов РФФИ, РНФ, федеральных программ «Интеграция», «Университеты России», ОБН-РАН «Биоресурсы России», Президиума РАН «Биоразнообразие», Московского правительства. Лауреат премий Европейской Академии (1997) и РАН (2000), грантов «Доктора наук РАН» (2005, 2006), премии им. И.И. Шувалова 1 ст. (2004), Национальной экологической премии (2009).

Учитывая плодотворную и многогранную творческую деятельность профессора Смагина А.В. и в связи с его 55-летием, Ученый Совет ф-та почвоведения МГУ, выдвигает его кандидатуру на соискание премию имени М.В. Ломоносова за научные работы в 2020 г.

Председатель Ученого совета, чл.корр. РАН / С.А. Шоба/

Зам. Председателя Ученого совета ф-та почвоведения МГУ чл-корр. РАН Т.В. Кравченко

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Ученого Совета факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова о выдвижении цикла научных работ «Физические основы почвенного конструирования: теория, эксперименты, инновационные материалы и технологии» доктора биологических наук, профессора, профессора кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ Смагина Андрея Валентиновича на соискание Премии имени М.В. Ломоносова в 2020г.

В цикле работ профессора А.В. Смагина, включающем университетскую монографию «Теория и практика конструирования почв» и серию сопутствующих публикаций в виде научных статей, заложены фундаментальные основы инновационного направления в почвоведении и инженерной экологии – почвенного конструирования, позволяющего с помощью физически-обоснованных моделей природной организации почв проектировать и создавать оптимальные по своим характеристикам почвенные объекты (конструктоземы) с использованием натуральных и синтетических материалов и современных технических средств. В теоретической части работы дан анализ эдафических факторов, процессов и моделей природной структурно-функциональной организации почв, составляющих фундаментальную базу предложенной методологии технологического моделирования для выявления оптимальных параметров почвенных конструкций на стадии их проектирования. Среди наиболее значимых теоретических и методических разработок – структурно-функциональная термодинамическая концепция физического состояния почв и грунтов с фундаментальными моделями основных гидрофизических характеристик (ОГХ) и изотерм сорбции воды на базе феномена расклинивающего давления по Дерягину, новыми, альтернативными эмпирическим секущим Воронина, физически-обоснованными способами выявления критических параметров физического состояния почв и грунтов по ОГХ, фундаментальная зависимость термодинамического потенциала и активности почвенной влаги от температуры, полученная с использованием уравнения Клаузиуса-Клапейрона и термодесорбционный метод оценки ОГХ, дисперсности (удельной поверхности) и предельного потенциала воды при температуре стандартной сушки (105 °С) на ее основе, модели капиллярности и смачиваемости полидисперсных пористых систем, феномен нелинейной зависимости осмотического потенциала жидкой фазы от влажности почв и физико-статистическая модель этого явления, комбинация метода центрифугирования и термодесорбции воды для оценки ее термодинамического потенциала во всем диапазоне варьирования от 0 до 1млн Дж/кг, модели и инструментальные методы оценки биологической активности и устойчивости к биодеструкции органических материалов в почвах, критерии, нормативы и методы изучения почвенных режимов функционирования (температурного, водно-воздушного, солевого, кислотно-щелочного, биологической активности) на базе современных автоматизированных средств инструментального анализа и мониторинга.

Наибольшую практическую значимость имеют инновационные материалы в виде наполненных амфифильными продуктами и современными средствами защиты растений (СЗР) синтетических гелевых структур и технологии почвенного конструирования с рядом оригинальных технологических разработок (способ слоистой закладки материалов и их экранирования от биодеструкции, разрыв капиллярности для подвешивания влаги и блокирования вторичного засоления, использование гелевых структур для удержания влаги, питательных веществ и СЗР в ризосфере). Их успешные испытания в столичном мегаполисе, странах Персидского залива и Узбекистане впервые на практике поливного земледелия и городского озеленения позволили получить стабильное 1.5-3 кратное увеличение биопродуктивности различных культур на фоне двукратной экономии влаги и надежной защиты корнеобитаемой толщи от вторичного засоления, загрязнения и патогенных организмов, включая фитофтороз картофеля (Патент РФ №2726564).

Выдвижение приурочено к 55-летию соискателя.

Председатель Ученого совета ф-та почвоведения МГУ,
доктор биологических наук, чл-корр РАН /С.А. Шоба/

Ученый секретарь Ученого совета ф-та почвоведения МГУ /

Зам. Председателя Ученого совета ф-та почвоведения МГУ, чл.-корр РАН

ВЫПИСКА

из протокола № 15 заседания кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова от 24 сентября 2020 г.

ПРИСУТСТВОВАЛИ: проф., д.б.н. Умарова А. Б., проф., д.б.н. Архангельская Т.А., н.с., к.б.н. Бутылкина М. А., инженер Быкова Г. С., уч.мастер, к.б.н. Гасина А. И., проф., д.б.н. Гончаров В. М, с.н.с., к.б.н. Дембовецкий А.В., н.с., к.б.н. Ежелев З. С., с.н.с.. д.б.н. Зубкова Т.А., вед.н.с., д.с.-х.н. Ковалев И.В., к.б.н. Кокорева А. А., техник, к.б.н. Макарова Е.П., м.н.с., к.б.н. Никифорова А.А., доц., д.б.н. Никифорова А.С., с.н.с., к.б.н. Садовникова Н. Б., вед.н.с., д.с.-х.н. Сапожников П. М., проф., д.б.н. Смагин А. В., техник, к.б.н. Сусленкова М. М., с.н.с., к.б.н. Тюгай З. Н., ст.преп., к.б.н. Фаустова Е. В., доц., к.б.н. Хайдапова Д. Д., инженер Черкас С. М., доц., к.б.н. Шваров А. П., проф., д.б.н. Шеин Е. В.

СЛУШАЛИ: доклад д.б.н., проф. Смагина Андрея Валентиновича о возможности выдвижения цикла работ «Физические основы почвенного конструирования: теория, эксперименты, инновационные материалы и технологии» на соискание Премии имени М.В. Ломоносова за научные работы.

В цикле работ профессора А.В. Смагина заложены фундаментальные основы инновационного направления в почвоведении и инженерной экологии – почвенного конструирования, позволяющего с помощью физически-обоснованных моделей природной организации почв проектировать и создавать оптимальные по своим характеристикам почвенные объекты (конструктоземы) с использованием натуральных и синтетических материалов и современных технических средств. В теоретической части работы дан анализ эдафических факторов, процессов и моделей природной структурно-функциональной организации почв, составляющих фундаментальную базу предложенной методологии технологического моделирования для выявления оптимальных параметров почвенных конструкций на стадии их проектирования. Среди наиболее значимых теоретических и методических разработок – структурно-функциональная термодинамическая концепция физического состояния почв и грунтов с фундаментальными моделями основных гидрофизических характеристик (ОГХ) и изотерм сорбции воды на базе феномена расклинивающего давления по Дерягину, новыми, альтернативными эмпирическим секущим Воронина, физически-обоснованными способами выявления критических параметров физического состояния почв и грунтов по ОГХ, фундаментальная зависимость термодинамического потенциала и активности почвенной влаги от температуры, полученная с использованием

уравнения Клаузиуса-Клапейрона и термодесорбционный метод оценки ОГХ, дисперсности (удельной поверхности) и предельного потенциала воды при температуре стандартной сушки (105 ºС) на ее основе, модели капиллярности и смачиваемости полидисперсных пористых систем, феномен нелинейной зависимости осмотического потенциала жидкой фазы от влажности почв и физико-статистическая модель этого явления, комбинация метода центрифугирования и термодесорбции воды для оценки ее термодинамического потенциала во всем диапазоне варьирования от 0 до 1млн Дж/кг, модели и инструментальные методы оценки биологической активности и устойчивости к биодеструкции органических материалов в почвах, критерии, нормативы и методы изучения почвенных режимов функционирования (температурного, водно-воздушного, солевого, кислотно-щелочного, биологической активности) на базе современных автоматизированных средств инструментального анализа и мониторинга.

Наибольшую практическую значимость имеют инновационные материалы в виде наполненных амфифильными продуктами и современными средствами защиты растений (СЗР) синтетических гелевых структур и технологии почвенного конструирования с рядом оригинальных технологических разработок (способ слоистой закладки материалов и их экранирования от биодеструкции, разрыв капиллярности для подвешивания влаги и блокирования вторичного засоления, использование гелевых структур для удержания влаги, питательных веществ и СЗР в ризосфере). Их успешные испытания в столичном мегаполисе, странах Персидского залива и Узбекистане впервые на практике поливного земледелия и городского озеленения позволили получить стабильное 1.5-3 кратное увеличение биопродуктивности различных культур на фоне двукратной экономии влаги и надежной защиты корнеобитаемой толщи от вторичного засоления, загрязнения и патогенных организмов, включая фитофтороз картофеля (Патент РФ №2726561).

Выдвижение приурочено к 55-летию соискателя.

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать цикл работ «Физические основы почвенного конструирования: теория, эксперименты, инновационные материалы и технологии» на соискание Премии имени М.В. Л.омоносова за научные работы в 2020 году.

Присутствовали 24 человек, проголосовали «за» – 24 человек, «против» – нет, воздержавшихся нет.

зав. кафедрой физики и мелиорации почв
профессор, д.б.н. А.Б. Умарова

Секретарь кафедры физики и мелиорации почв Г.С. Быкова