

МАСШТАБИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВОГРУНТОВ*

А. Н. Салугин¹, доктор сельскохозяйственных наук,
Е. В. Мелихова², доктор технических наук,
Т.А. Рыжова², аспирант

¹Федеральный научный центр агроэкологии РАН,
400062, Волгоград, просп. Университетский, 97
E-mail: saluginan@mail.ru

²Волгоградский государственный аграрный университет,
400002, Волгоград, просп. Университетский, 26
E-mail: am255@mail.ru

Исследования проводили с целью обоснования возможности использования метода масштабирования для моделирования основной гидротехнической характеристики почв по гранулометрическому составу с последующей оптимизацией процессов мелиорации. Пространственная неоднородность почв сильно затрудняет моделирование влагопереноса, который зависит от гидрофизических свойств влагопроводящей среды. Для описания пространственной неоднородности наиболее эффективен метод масштабирования (скейлинг). В нашей работе он используется для определения усреднённой (базовой) кривой основной гидрофизической характеристики по данным гранулометрического состава почвы. Построение модели передвижения влаги в ненасыщенной зоне аэрации осуществляли на основе модели К. Косуги с целевой функцией регрессии, которая позволяет уменьшить число гидрофизических параметров, используя гранулометрический состав почвы. Для описания неоднородности почв был применен физический метод масштабирования, основанный на использовании логнормального распределения почвенных частиц по размерам. В результате были определены параметры для основной гидрофизической характеристики в виде среднего и дисперсии логнормального распределения почвенных частиц по размерам. Объектами исследования служили почвенные образцы с различным гранулометрическим составом: песок (sand), суглинистый песок (loamy sand), опесчаненный суглинок (sandy loam) и суглинок (loam) и их гранулометрический состав. В отличие от обычного скейлинга физическое масштабирование обеспечивает теоретически понятную интерпретацию масштабных коэффициентов с учетом того, что радиусы пор распределены логнормально и однозначно связаны с почвенным давлением. Отдельные образцы выборки при случайном отборе проб образуют опорную (базовую) кривую, соответствующую усредненным гидрофизическим свойствам почвы. Осредненная основная гидрофизическая характеристика в виде базовой кривой связывает выборку масштабными коэффициентами, адекватно отражает гидрофизику почвенного горизонта. Подобное масштабирование позволяет физически обосновать параметры базовой основной гидрофизической характеристики, обеспечивая гидрофизическую параметризацию исследуемой территории. Это обстоятельство весьма важно в практическом аспекте, особенно для решения задач мелиорации, изучения динамики водного баланса, управления водными ресурсами в целом.

SCALING OF HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOILS

Salugin A. N., Melikhova E. V., Ryzhova T. A.

¹Federal Scientific Center of Agro-ecology, Russian Academy of Sciences,
400062, Volgograd, prosp. Universitetskii, 97
E-mail: saluginan@mail.ru

²Volgograd State Agricultural University,
400002, Volgograd, prosp. Universitetskii, 26
E-mail: mel-v07@mail.ru, am255@mail.ru

The spatial heterogeneity of soils significantly complicates the modeling of moisture transfer, which depends on the hydro-physical properties of the moisture-conducting medium. To describe spatial heterogeneity, the scaling method is the most effective. In our work, this method is used to obtain an averaged (basic) curve of the main hydro-physical characteristic from the data of the granulometric composition of soils. To construct a model of the movement of moisture in an unsaturated aeration zone, the model of K. Kosugi was used using the objective regression function, which allows you to reduce the number of hydro-physical parameters using the granulometric composition of the soil. To describe the heterogeneity of soils, a physical scaling method was applied, based on the use of a log-normal size distribution of soil particles. As a result, the parameters for the main hydro-physical characteristic were obtained in the form of the mean and variance of the log-normal size distribution of soil particles. The objects of the study were soil samples with different granulometric composition: sand (sand), loamy sand (loamy sand), sandy loam (sandy loam) and loam (loam) and their granulometric composition. The considered methods for restoring the main hydro-physical characteristic for the soils of a model agricultural field containing soils with different granulometric composition made it possible to physically substantiate the parameters of the basic water-retaining curve describing the heterogeneity of the soil environment. The base horizon moisture-holding capacity curve provides valuable information for precision irrigation reclamation.

Ключевые слова: масштабирование, скейлинг, влагоудерживающая способность, влагопроводность логнормальное распределение, гранулометрический состав.

Key words: scaling, moisture retention capacity, moisture conductivity, lognormal distribution, granulometric composition.

При математическом моделировании внутрпочвенного движения воды в процессе полива, стока и формирования грунтовых вод необходима информация о пространственной неоднородности почв – распределении гидрофи-

зических свойств по глубине зоны аэрации и в почвенном горизонте. К их характеристикам относятся: распределение почвенных частиц по размерам, наименьшая влагоемкость (НВ), влажность завядания (ВЗ), гигроскопическая

*Исследования выполнены в рамках ГЗ№ FNFE-2022-0011

влажность (ГВ) [1, 2, 3]. Все эти свойства изменяются по территории поля случайно с некоторым разбросом от среднего. Совершенно очевидно, что моделирование гидрологических процессов ирригации невозможно без учёта неоднородности почвенной толщи. Пространственная неоднородность почвы усложняет моделирование влагопереноса из-за того, что коэффициент влагопроводности, входящий в уравнение Л. А. Ричардса, выступает функцией искомой влажности. Гидрофизические свойства почв напрямую зависят от их гранулометрического состава [4, 5, 6]. Влагоудерживающая способность $\theta(h)$ и влагопроводность — $K(\theta)$ могут быть рассчитаны полуэмпирическим восстановлением [7, 8, 9]. В работах [6, 7] приведены результаты сравнения некоторых полуэмпирических методов определения основной гидрофизической характеристики (ОГХ) для задач прецизионной ирригации.

Ранее [9] была предложена идея масштабирования, состоящая в том, что физические свойства могут сохраняться при переходе от объекта к объекту, обладающему различными размерами (масштабами). Эту концепцию К. Косуги [10, 11] использовал для моделирования и поиска необходимых коэффициентов масштабирования при изучении почв с различным гранулометрическим составом. В научных исследованиях за последнее десятилетие предлагались различные методы определения масштабных коэффициентов при моделировании гидрофизических свойств почвы. Большинство из них показали, что коэффициенты масштабирования, объединяющие почвы с различным гранулометрическим составом (ГС), распределены по радиусам пор логнормально в диапазоне изменений почвенных характеристик [12, 13, 14]. На основе логнормального распределения коэффициентов масштабирования были предложены стохастические модели для оценки влияния гидрофизических свойств почв на насыщенный влагоперенос. Используя современные методологии, исследователи пришли к выводу, что неоднородность гидрофизических свойств почвы напрямую связана с дисперсией влажности. В работах [15, 16, 17] авторы изучали явления инфильтрации, используя логарифмически распределённые масштабные коэффициенты. Предполагая, что функция распределения коэффициента масштабирования логнормальна, были получены осреднённые параметры и функции для моделирования гидрологических процессов на водосборах с переносом растворённых веществ. Авторы отмечают перспективность метода масштабирования для описания морфологии почв, а также при моделировании поведения влаги в зоне аэрации.

Отметим, в связи с этим, что эффективность масштабирования (scaling, скейлинг) для описания неоднородности почв продемонстрировали многие исследования [12, 14, 18]. Однако не все авторы отмечают статистическую значимость логнормального распределения масштабного коэффициента. Их логнормальность теоретически не предполагалась. Это объясняется тем, что в большинстве случаев использовали полуэмпирические формулы для гидрофизических характеристик, которые не учитывают их физическую сущность. Задачи работ К. Косуги заключались в том, чтобы разработать физически обоснованный подход к масштабированию кривых влагоудержания с теоретически обоснованным логарифмически нормальным распределением коэффициентов масштабирования. В. Р. Гарднер обосновал прямую связь между размером почвенных частиц и размером пор [12]. Ж. Р. Ниммо и П.С. Наста предложили похожую концепцию влияния гранулометрического состава на ОГХ [19, 20]. Ю. А. Пачепский получил фрактальную размерность почвенных пор с учётом ГС. Таким образом, размерная инвариантность [9] и концепция логнормального распределения масштабных коэффициентов К. Косуги [10], выступают основой определения интегральных характеристик неоднородности

почв, распределённых неравномерно и хаотически по всему пространству возделывания сельхозкультур.

Прецизионное орошение требует адекватной информации о гидрофизических свойствах почв по длине склона, в случае неоднородного почвенного горизонта. Эта информация необходима для автоматизации передвижных оросительных систем. Данные по ОГХ, полученные из натуральных образцов, где производится орошение, обеспечивают при этом оптимизацию прецизионной ирригации.

Цель исследований – обосновать возможность использованием метода масштабирования для моделирования основной гидротехнической характеристики почв по гранулометрическому составу с последующей оптимизацией процессов мелиорации.

Методика. Для моделирования передвижения влаги в ненасыщенной зоне аэрации необходимо большое число параметров, что затрудняет численную реализацию решения уравнения движения. К. Косуги [11] предложил оригинальный способ оптимизации целевой функции регрессии, который позволяет уменьшить число гидрофизических параметров, используя ГС. В результате им были получены параметры для ОГХ в виде среднего и дисперсии логнормального распределения почвенных частиц по размерам.

Кривые ОГХ в нашей работе восстанавливали с использованием полуэмпирической формулы [4, 5] и методом нелинейной регрессии кумулятивных кривых ГС. После восстановления ОГХ проводили расчёт коэффициентов масштабирования для формирования базовой кривой влагоудержания. Коэффициенты масштабирования, сравнивающие различные образцы с эталоном, также распределены логнормально аналогично тому, как распределены почвенные частицы по своим размерам.

Объектами исследования служили почвенные образцы с различным гранулометрическим составом: песок (sand), суглинистый песок (loamly sand), суглинок (loam), глинистый суглинок (clay loam) и глина (clay). Данные ГС выступали как основные при восстановлении влагоудерживающей способности образцов, отобранных в разных точках исследуемого поля. ОГХ рассчитывали по кумулятивным кривым ГС, с использованием обобщённой линейной регрессии математической библиотеки пакета Matlab. Предполагалось, что выборка образцов представляет некоторую часть неоднородного почвенного горизонта сельскохозяйственного поля.

Масштабный коэффициент α_i определяли по формуле: $\alpha_i = \lambda_i / \lambda^*$, где λ_i и λ^* – характеристический размер (масштаб) соответственно для i -го образца и эталона. Отсюда можно перейти к масштабному коэффициенту для радиусов: $\alpha_i = r_i / r^*$ или $\ln \alpha_i = \ln r_i - \ln r^*$. Поскольку логарифмы коэффициентов масштабирования и радиусы связаны линейно, можно считать, что коэффициенты α_i также распределены логнормально.

Наличие функциональной связи ОГХ с логнормальным распределением почвенных частиц, описываемых гранулометрическим составом, свидетельствует о том, что математическая статистика подтверждает физическую обоснованность гидрофизических параметров, с использованием ОГХ. Руководствуясь концепцией [11], получим распределение коэффициентов масштабирования, которое в сочетании с базовой ОГХ описывает пространственную неоднородность почвенного горизонта.

Функция плотности распределения радиусов почвенных пор $p(r)$ определяется уравнением: $p(r) = dS_e/dr$, где S_e – эффективная (приведенная) влажность $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, θ_s и θ_r – насыщенная и остаточная влажности с объемной размерностью (см^3 и см^3). Соотношение $p(r)dr = dS_e$ определяет содержание влаги в объёме капилляров с радиусами, заключёнными в интервале от r до $r+dr$ в 1 см^3 . Интегрирование

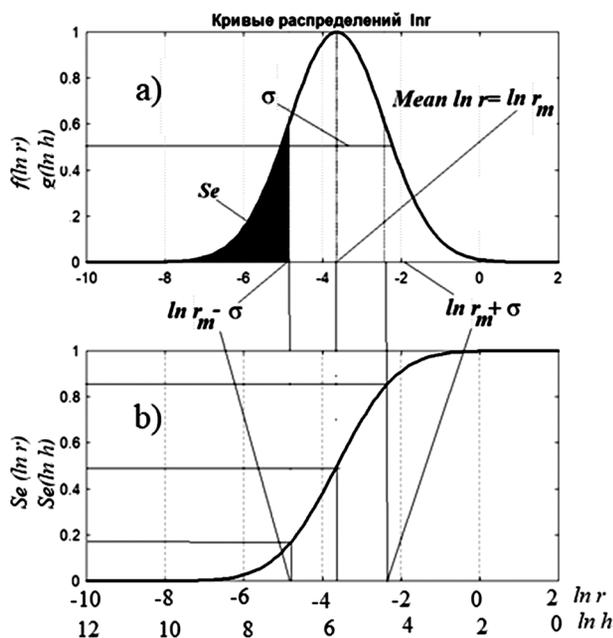


Рис. 1. Теоретические кривые логнормального распределения: плотность вероятности (a) $f(\ln r)$ и кумулятивная функция (b) $S_e(\ln r)$ со средним радиусом пор ($\ln r_m = -3,6$ ($r_m = 2,73 \times 10^{-2}$ см) и средним капиллярным давлением ($\ln h_m = 5,43$; дисперсия ($\sigma^2 = 1,2$).

по радиусам даёт кумулятивную функцию: $S_e(r) = \int_0^r p(r) dr$. Таким образом, $S_e(r)$ определяет влажность почвы, когда все поры с радиусами, равными или меньшими некоторого r , заполнены водой. В этом, собственно, и заключается физика этой концепции. Радиус r связан с капиллярным давлением h (для ненасыщенной почвы) выражением (1):

$$h = 2\gamma \cos \beta / \rho g r = A/r \text{ или } \ln h = \ln A - \ln r, \quad (1)$$

где γ — поверхностное натяжение, β — краевой угол, ρ — плотность воды, g — ускорение свободного падения [15]. Величина A для системы воздух—вода—почва равна $0,149 \text{ см}^2$.

Функцию $S_e(r)$ можно преобразовать в функцию $S_e(h)$, которая, собственно, и выступает кривой удержания или кривой ОГХ. Вместе с тем, плотность распределения логарифмов ($\ln r$) можно переписать как: $f(\ln r) = dS_e/d \ln r$. Выражение $f(\ln r) d \ln r = dS_e$ определяет объем образца с радиусами от $\ln r$ до $\ln r + d \ln r$. Аналогично, для капиллярного давления $\ln h$ можно записать: $g(\ln h) = dS_e/d \ln h$. Связь между $p(r)$, $f(\ln r)$ и $g(\ln h)$ выражается общим равенством:

$$p(r) dr = f(\ln r) d \ln r = g(\ln h) d \ln h = dS_e. \quad (2)$$

Полученное выражение уникально. Оно связывает физические параметры почвы с её приведенной влажностью S_e , то есть способностью почвы к восприятию и удержанию влаги. Выражение для приведенной влажности S_e можно получить интегрированием:

$$S_e(\ln r) = \int f(\ln r) d \ln r$$

К. Косуги [10] применил логнормальный закон для определения водоудержания. На основе этой модели $f(\ln r)$ определяется распределением (3):

$$f(\ln r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (3)$$

где $\ln r_m$ и σ^2 — среднее и дисперсия $\ln r$. Параметр r_m выступает средним геометрическим радиусом пор и соответствует радиусу, когда $S_e(\ln r_m) = 0,5$ (рис. 1а).

Среднее значение $\ln h_m$ определяется средним значением $\ln r_m$ прямым соотношением: $\ln h_m = \ln A - \ln r_m$, а дисперсия $g(\ln h) = \sigma^2$ равна дисперсии $f(\ln r)$. Интегралы от $f(\ln r)$ и $g(\ln h)$ дают кумулятивные распределения $S_e(\ln r)$ и $S_e(\ln h)$ (рис. 1b), из чего следует, что h_m — это капиллярное давление при приведённой влажности $S_e = 0,5$. Параметр дисперсии σ определяется так, что $S_e(\ln h_m - \sigma) - S_e(\ln h_m + \sigma) = 0,68$ и определяет диапазон изменений S_e вблизи точки перегиба. Кривая ОГХ получается интегрированием:

$$S_e \ln r = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln r - \ln r_m}{\sqrt{2\sigma}} \right), \quad (4)$$

$$S_e(\ln h) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln h_m - \ln h}{\sqrt{2\sigma}} \right).$$

где $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, $\operatorname{erf}(x)$ — интеграл ошибок. Кумулятивные распределения (4) адекватно описывают экспериментальные данные по ОГХ для большинства почв и выступают физически обоснованным моделированием водоудерживающей способности.

В работе изучены образцы почв с различным распределением частиц по размерам (табл. 1). Данные по гранулометрическому составу послужили исходным информационным обеспечением математических моделей перемещения влаги в верхних слоях почвы при водной мелиорации с учетом эффектов масштабирования.

Для восстановления ОГХ использовали данные ГС в виде логнормальных распределений с некоторыми средними $\ln r_{mi}$ и дисперсией σ_i^2 для каждого образца ($i = 1, 2, \dots, N$); N — общее количество образцов, взятых из пахотного слоя исследуемого поля (рис. 2).

Результаты и обсуждение. Результаты восстановления ОГХ приводили в виде кумулятивных кривых S_e и их производных (плотность распределения) (рис. 3). Параметры $\ln r_m$, $\ln h_m$ и σ^2 были рассчитаны на основе данных гранулометрического состава методом обобщенной линейной регрессии `glmfit(X)` пакета Matlab. Приведенную влажность (S_e) вычисляли по формуле (4) как функцию логарифма капиллярного радиуса или давления. Следует отметить существенное преимущество процедуры обобщенной линейной регрессии перед нелинейной, которое состоит в том, что подгонка параметров производится непосредственно на кумулятивную функцию распределения (4).

Рассчитанные параметры демонстрируют справедливость гипотезы о логнормальном распределении радиусов

Табл. 1. Гранулометрический состав почв в слое 0...0,2 м

№№	ГС почвы	1...0,25	0,25...0,05	0,05...0,01	0,01...0,005	0,005...0,001	< 0,001
1	Sand	24,8	71,9	0,56	0,6	0,94	1,2
2	Loamly sand	17,1	43,7	16,3	3,6	4,7	14,6
3	Loam	8,3	32,4	25,7	6,3	6,1	21,2
4	Clay loam	6,5	10,2	32	7,2	9,6	34,5
5	Clay	1,3	2,1	36,5	12,2	10,5	37,4

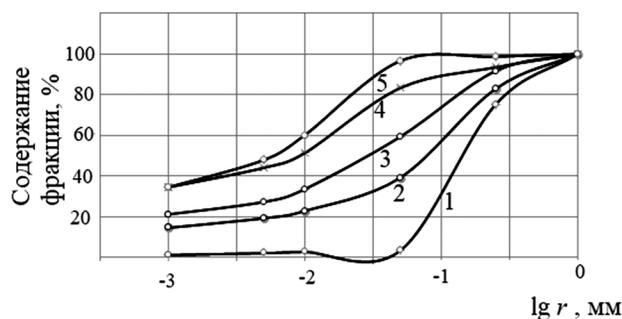


Рис. 2. Гранулометрический состав образцов: 1 — Sand, 2 — Loamly sand, 3 — Loam, 4 — Clay loam, 5 — Clay.

капиллярной модели порового пространства. Теоретически это подтверждает линейную зависимость между средними значениями логарифмов радиусов (давлений) и их дисперсиями, полученная с использованием функции `normplot` ($\ln r_i$) пакета Matlab [14].

Формулу для расчета коэффициентов масштабирования α_i ($\alpha_i = \lambda_i / \lambda^*$) в рассматриваемом случае можно применить к радиусу как характеристическому масштабу, то есть: $\alpha_i = r_i / r^*$ или $\ln \alpha_i = \ln r_i - \ln r^*$. Масштабные коэффициенты рассчитывали по средним $\ln r_m$ ($\ln h_m$) и их дисперсиям σ_m^2 , при этом также была подтверждена гипотеза логнормальности распределения для масштабных коэффициентов α_i (табл. 2, 3).

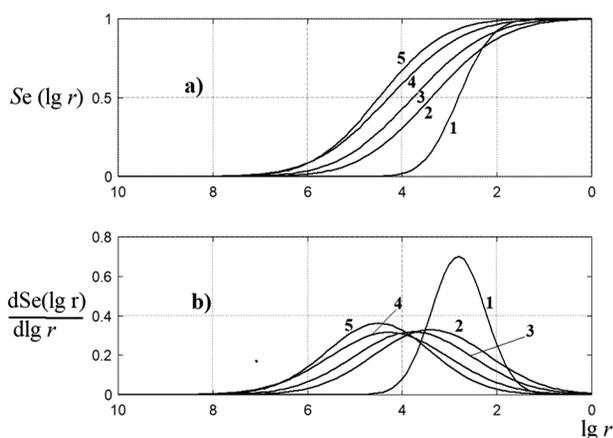


Рис. 3. Кумулятивные (а) и дифференциальные (б) кривые приведенной влажности S_e , определенные с использованием обобщенной линейной регрессии: 1 — песок, 2 — суглинистый песок, 3 — суглинок, 4 — глинистый суглинок, 5 — глина.

Среднее значение капиллярно-сорбционного давления ($\ln h_{mi}$) задает основу базовой (осредненной) кривой водоудерживающей способности. Средние значения σ_i^2

Табл. 2. Результаты моделирования

Параметр модели	Sand	Loamly sand	Loam	Clay loam	Clay
A_i	0,8302	0,8933	1,0695	1,1637	1,0433
$\alpha_i - \text{Mean } \alpha_i$	-0,1698	-0,1067	0,0695	0,1637	0,0432
Σ_i	0,5695	1,2120	1,2517	1,2636	1,1016
$\ln h_i$	2,8117	3,3913	3,7748	4,2841	4,952

описывают дисперсии приближений к эталонной кривой. Результаты расчетов (рис. 3, табл. 2) свидетельствуют, что кривые ОГХ для легких почв (образец № 1) имеют более низкие значения средних ($\ln h_{mi}$) и (σ_i^2). Это означает, что размеры частиц соответствуют более низкому капиллярно-сорбционному давлению, а разброс значений радиусов незначителен. У образца № 5 наименьший средний радиус с более значительным разбросом пор по размерам логнормального распределения (см. рис. 3).

Табл. 3. Результаты масштабирования*

Показатель	α	σ^2	$\ln h_{m,i}$
Дисперсия	0,0184	0,1222	0,4443
Стандартное отклонение	0,1358	0,3496	0,6665
Среднее значение	1	2,9879	3,8427

*параметры базовой кривой водоудержания: $h = 3,914; 4,612$ и $\sigma^2 = 1,317; 1,904$

Такие результаты согласуются с данными других исследователей [18], которые при восстановлении ОГХ по ГС использовали метод нелинейных наименьших квадратов. Для образцов Sandy loam и Loam этими авторами были получены величины, близкие к установленным в нашем исследовании (см. табл. 2). Средние значения $\ln h$ и σ^2 для почв Loamly sand и Loam равны соответственно: $\ln h = 3,914; 4,612$ и $\sigma^2 = 1,317; 1,904$; что свидетельствует об адекватности процедуры восстановления ОГХ (см. табл. 3). Преимущество алгоритма `glmfit`($\ln r$) заключается в том, что регрессия проводится непосредственно на статистические функции распределения случайных величин, которые участвуют в аппроксимации данных ГС.

Использование изомерности строения почв позволяет не только уменьшить число параметров подгонки при восстановлении ОГХ, но и в значительной степени повысить адекватность описания неоднородности почв в моделях влагопереноса на протяженных водосборах. Неоднородность почв, как было отмечено, выступает одним из основных препятствий в расчетах водного режима почвенно-растительного покрова естественных пастбищ. Ведущая роль при оценке неоднородности в пространстве почв отводится гранулометрическому составу. При этом вводится понятие «базового» тела, отражающего в своих характеристиках определенную

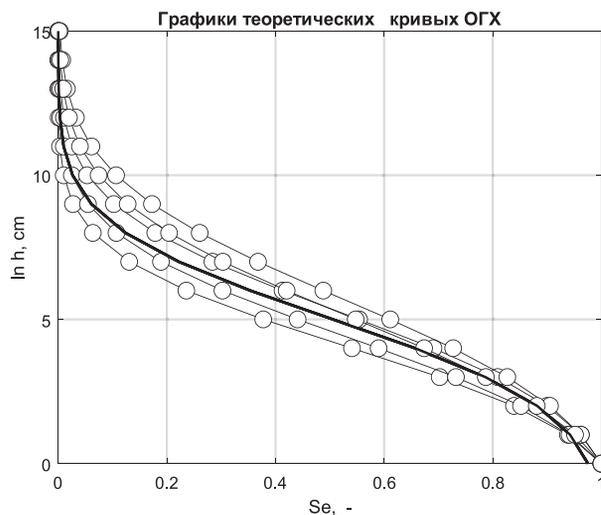


Рис. 4. Кривые ОГХ, полученные восстановлением из гранулометрических составов (жирная линия — результат масштабного усреднения).

территорию агроландшафта. Процедура масштабирования существенно дополняет математическое моделирование влагопереноса более информативными исходными данными. Выступая «базовыми» характеристиками тестовых территорий, параметры скейлинга позволяют точнее интерпретировать результаты наблюдений за влагопереносом и испарением. Метод масштабирования выступает, на наш взгляд, одним из перспективных направлений изучения процессов, протекающих в гетерогенных почвах. Особенно это важно при решении практических задач водной мелиорации в приближении однородности почвы с использованием данных масштабирования.

Таким образом, описание неоднородности почв на математическом уровне необходимо при разработке значительного числа моделей, связанных с гидрологией, мелиорацией, водным режимом растений и др. Метод масштабирования (скейлинг) наиболее эффективен при решении задач, связанных с пространственной неоднородностью почвенного пространства. Приведенный в статье физический метод масштабирования основан на логнормальном распределении почвенных частиц по размерам, что открывает возможности для расчета коэффициентов масштабирования и параметров базовой ОГХ непосредственно по гранулометрическому составу с использованием обобщенной линейной регрессии. В отличие от обычного скейлинга физическое масштабирование обеспечивает теоретически понятную интерпретацию масштабных коэффициентов с учетом того, что радиусы пор распределены логнормально и однозначно связаны с почвенным давлением. Отдельные образцы выборки при случайном отборе проб образуют опорную (базовую) кривую, соответствующую осредненным гидрофизическим свойствам почвы. Осредненная ОГХ в виде базовой кривой связывает выборку масштабными коэффициентами, адекватно отражает гидрофизику почвенного горизонта. Подобное масштабирование позволяет физически обосновать параметры базовой ОГХ, обеспечивая гидрофизическую параметризацию исследуемой территории. Это обстоятельство весьма важно в практическом аспекте, особенно для задач мелиорации, изучения динамики водного баланса, управления водными ресурсами в целом.

Литература

1. Мазиров М. А., Шеин Е. В. Полевые исследования свойств почв. Владимир: Владимирский государственный университет, 2012. 71 с.
2. Рыжова Т. А., Мелихова Е. В., Рогачев А. Ф. Компьютерное моделирование и определение основной гидрофизической характеристики на примере светло – каштановых почв Нижнего Поволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 3 (55). С. 397–406.
3. Салугин А. Н., Кулик А. К., Власенко М. В. Водопроницаемость ненасыщенных почвогрунтов аридной зоны // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 21–24.
4. Судницын И. И. Влияние размера элементарных почвенных частиц на их основную гидрофизическую характеристику // Почвоведение. 2015. № 7. С. 843–850.
5. Салугин А. Н. Применение основных гидрофизических характеристик для моделирования вертикального движения влаги в зоне аэрации // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2 (49). С. 58–65.
6. Почвенно-гидрофизическое информационное обеспечение прецизионного ирригационного земледелия / В. В. Терлеев, Е. А. Дунаева, Р. С. Гиневский и др. // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2 (26). С. 244–260.
7. Моделирование гидрофизических свойств почвы как капиллярно-пористого тела и усовершенствование метода Муалема-Ван Генухтена: теория / В. В. Терлеев, М. А. Нарбут, А. Г. Тонаж и др. // Агрофизика. 2014. № 2 (14). С. 35–44.
8. Умарова А. Б., Шеин Е. В., Кухарук Н. С. Основная гидрофизическая характеристика агросерых почв: влияние анизотропии и масштабного фактора // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1460–1466.
9. Человечкова А. В. Использование программного моделирования для построения и анализа основной гидрофизической характеристики выщелоченных черноземов Зауралья // Альманах мировой науки. 2016. № 5-1 (8). С. 48–49.
10. Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1996. Vol. 32. P. 2697–2703.
11. Kosugi K., Hopmans J. W. Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution // Soil Science Society of America Journal. 1998. Vol. 62. P. 1496–1505.
12. Gardner W. R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution // Soil Science Society of America Journal. 1956. Vol. 20. P. 151–153.
13. Модель прогнозирования основной гидрофизической характеристики набухающего грунта с учетом циклов высыхания и намокания / Шаокунь Ма., Сю Х., Чжибо Д., Минь Ма., Юй Ш. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 38–50.
14. Further tests of the HYPROP evaporation method for estimating the unsaturated soil hydraulic properties / C. R. Bezerra-Coelho, L. Zhuang, M. C. Barbosa, et al. // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2018. Vol. 66. No. 2. P. 161–169. doi: 10.1515/johh-2017-0046.
15. Умарова А. Б., Шеин Е. В., Кухарук Н. С. Основная гидрофизическая характеристика агросерых почв: влияние анизотропии и масштабного фактора // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1460–1466.
16. Physics-Informed Data-Driven Models to Predict Surface Runoff Water Quantity and Quality in Agricultural Fields / J. Liang, W. Li, S. A. Bradford, et al. // Water. 2019. doi: 10.3390/w11020200. URL: <https://www.researchgate.net/publication/304755334> doi103390ijms17060953 (дата обращения: 15.02.2022).
17. Медведев С. А., Полуэктов Р. А., Тонаж А. Г. Оптимизация стратегии орошения с использованием методов поливариантного анализа динамики агроэкосистем // Мелиорация и водное хозяйство. 2012. № 2. С. 10–13.
18. Rahmati M., Vanderborght J., Šimunek J. Soil hydraulic properties estimation from one-dimensional infiltration experiments using characteristic time concept // Vadose Zone Journal. 2020. P. 1–22. URL: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/vzj2.20068>. (дата обращения: 15.02.2022).
19. Prediction of spatially variable unsaturated hydraulic conductivity using scaled particle-size distribution functions / P. Nasta, N. Romano, S. Assouline, et al. // Water Resources Research. 2013. Vol. 49. No. 7. P. 4219–4229.
20. Алексеев В. В., Максимов И. И. Аэродинамический метод получения основной гидрофизической характеристики почв // Почвоведение. 2013. № 7. С. 822–828.

Поступила в редакцию 16.12.2021
После доработки 09.01.2022
Принята к публикации 23.03.2022