

УДК 631.43/631.421.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В ЛИЗИМЕТРАХ

© 2023 г. А. Н. Салугин^а, Р. Н. Балкушкин^{а, *}^аФедеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, пр-т Университетский, 97, Волгоград, 400062 Россия

*e-mail: balkushkin_r@vfanc.ru

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Рассмотрены вопросы почвенно-гидрофизического обеспечения математических моделей передвижения влаги, учитывающих неоднородность почвы, обусловленную пространственным изменением гранулометрического состава. Изучены процессы вертикального движения влаги на крупногабаритных лизиметрах ФНЦ агроэкологии РАН (Волгоград). Влияние статистической неоднородности гидрофизических параметров субстратов лизиметров исследовано на моделях динамики влагопереноса и формирования гравитационного стока, разработанных в среде программного пакета HYDRUS-1D. Учитывалось изменение гранулометрического состава по вертикали профиля лизиметров и связанная с ним изменчивость основной гидрофизической характеристики (ОГХ). Гранулометрическая неоднородность субстратов оценивалась методом масштабирования по масштабным коэффициентам параметров ОГХ в предположении о нормальном распределении вероятностей логарифмов радиусов капилляров порового пространства между почвенными частицами. Изучалось влияние гранулометрического состава на водоудерживающую способность, граничные и начальные условия, интенсивность гравитационного стока и кумулятивное накопление влаги.

Ключевые слова: масштабирование гидрофизических характеристик, влагоперенос в почве, ОГХ, лизиметры

DOI: 10.31857/S0032180X23600257, **EDN:** ECUJUV

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего исследования являлось экспериментальное и теоретическое обоснование метода масштабирования (скейлинга) водоудерживающей способности субстратов на больших лизиметрах при решении задач влагопереноса в естественных гетерогенных почвенных горизонтах. Для изучения вертикального передвижения влаги в почвах в диапазоне влажности от полной до наименьшей влагоемкости исследователю необходимы данные о том, как зависят влагонасыщенность и гидравлическая проводимость от капиллярного давления влаги [3].

Почвенная гидрология, изучающая передвижение внутрисочвенной воды с учетом гидрофизических свойств почв, в настоящее время совершенствуется как в экспериментальном, так и в теоретическом аспектах [1, 3, 11, 29, 30]. Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) впервые в России была введена Глобусом [3]. Она отражает способность почвы удерживать воду, накапливаемую в капиллярах почвенного каркаса, и выражается зависимостью влагонасыщенности от капиллярно-сорбционного давления влаги: $S_e(|\psi|)$ [3, 8, 30]. В иностранной литературе эта ха-

рактеристика имеет аббревиатуру WRC (Water Retention Curve) [9–11, 13]. Прямыми измерениями изучение этой зависимости является весьма трудозатратным, так как требует лабораторных измерений в широком диапазоне давлений – от 0 до 10^4 МПа с привлечением различных по природе физических методов [3, 8, 11]. Хрестоматийный способ моделирования водоудерживающей способности и гидравлической проводимости ($K(\theta)$) в ненасыщенной почве подробно изложен в статьях [22, 23, 29, 30], где применялись полуэмпирические методы моделирования WRC, использующие регрессию. Метод восстановления ОГХ посредством математического моделирования – один из способов получить функцию водоудерживающей способности почв без привлечения лабораторных измерений. За основу берутся гидрофизические характеристики почвы, которые служат параметрами искомой функции водоудержания или гидравлической проводимости.

Несмотря на длительную практику, функция WRC Муалема-Ван Генухтена приводит к досадным противоречиям, отмеченным в статьях [16, 25, 26]. Из-за отсутствия физического смысла параметров функции водоудержания и функции

гидравлической проводимости (ФГП) результаты моделирования не являются отражением реальности. Моделирование ОГХ с привлечением большого числа подгоночных параметров в виде педотрансферных функций (порядка 6–8) часто приводит к неоднозначности. В работах [9, 10] приводятся убедительно обоснованные усовершенствования метода Муалема-Ван Генухтена и Косуги. Физическая обоснованность базируется в их работах на логнормальном распределении радиусов капилляров порового пространства почв. Авторы совместно рассматривают водоудерживающую способность почв и функцию гидравлической проводимости, объединяя их в пару функции с общими гидрофизическими параметрами. Использование дополнительного аддитивного параметра, учитывающего явление входа воздуха, обуславливающего почвенный гистерезис, в модифицированных моделях Муалема-Ван Генухтена и Косуги, позволило авторам уточнить аппроксимацию ОГХ и ФГП, установив физически обоснованную связь между параметрами модели. Оказалось, что параметр α ОГХ модели Муалема-Ван Генухтена связан с физическим средним радиусом капилляров порового пространства модели Косуги. Физическую реальность приобретает также параметр $n = \frac{4}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, где

σ – среднеквадратическое отклонение радиусов цилиндрических капилляров от их среднего, используемого в моделях Косуги. В работах [9, 10] были проанализированы многолетние испытания моделей Муалема-Ван Генухтена и Косуги, что позволило авторам реализовать существенный прорыв в физическом понимании параметров ОГХ и ФГП. Полученная идентификация параметров позволила выявить их функциональную связь с гидрофизическими свойствами почв. Таким образом, к настоящему времени почвенная гидрология в значительной мере продвинулась к более совершенному математическому моделированию передвижения влаги в ненасыщенных почвах с использованием физической интерпретации параметров, участвующих в модели.

В настоящем исследовании за основу были взяты аналитические модели Косуги [17–20], сокращающие число параметров аппроксимации ОГХ до двух: среднего значения r_m и дисперсии σ^2 логнормального распределения вероятностей радиусов r почвенных капилляров порового пространства почвы. Для описания водоудерживающей способности и гидравлической проводимости в моделях Муалема-Ван Генухтена предполагается однородность (гомогенность) почвенной среды, в то время как в реальной природе это не так: они существенно изменяются по гранулометрическому составу при передвижении по почвенному профилю [4, 6, 7, 22]. Уменьшение числа пара-

метров аппроксимации при моделировании функции водоудержания можно осуществить, взяв за основу тот факт, что ОГХ физически связана с внутренней структурой почвенного каркаса. В этом отношении более удобен метод Косуги. Кроме этого, данный метод делает модель ОГХ более обоснованной с физической интерпретацией входящих в нее параметров. Информация о внутреннем строении почв, отраженная в гранулометрическом составе, в моделях Косуги способствует более очевидному восприятию влагопереноса и испарения в ненасыщенных почвах. Объяснение результатов математического моделирования и эксперимента в этом случае можно проводить на основе капиллярной природы гидрологических внутрипочвенных процессов [3, 6, 17]. Автор [15], описывая капиллярную структуру почвы, обосновал прямую связь размеров частиц с размерами пор между ними в виде капилляров.

Теоретической основой капиллярной парадигмы удержания влаги и ее перемещения в поровом пространстве ненасыщенной почвы служит работа [21]. Подобие размерности, доказанное этими авторами при изучении изменчивости физических свойств и процессов, протекающих внутри разномасштабных объектов (принцип подобия размерности), позволило объединять различные по гранулометрическому составу почвы с эталоном – почвой с известными гидрофизическими характеристиками. В результате возник принципиально новый подход к изучению гетерогенных сред на основе масштабирования, использующего принцип подобия размерности.

Эффективность процедуры масштабирования при моделировании неоднородности почвы, связанной с ГС, была доказана многими авторами [4, 11, 12, 24]. Однако в этих работах исключалась стохастическая парадигма масштабного эффекта, доказанного авторами [21]. Чаще применялись полумпирические формулы без физической обоснованности входящих в эти формулы параметров. Работы [17–20] обосновали физическую сущность масштабирования. Для нормального распределения логарифмов капиллярных радиусов порового пространства функция WRC в работах Косуги приобрела физическую ясность, как и капиллярная природа внутрипочвенного давления влаги (ψ).

В целом работы по масштабированию в контексте неоднородности ГС весьма разнообразны и базируются, в большинстве случаев, на регрессионном подходе к моделированию функций ОГХ и ФГП. Более универсальная модель была предложена в работе [13], которая использовалась затем в статье [12] для масштабирования водоудерживающей способности. С учетом пространственного разброса масштабных коэффициентов были предложены статистические модели про-

цессов перемещения влаги в условиях неполного насыщения [6, 7, 22, 24]. Авторы [22] изучали инфильтрацию в почве в режиме насыщения, исследовали статистический характер гидрофизических процессов, связанных с переносом растворенного вещества. В статье отмечается перспективность масштабирования при изучении динамики почвенной влаги в естественных сельскохозяйственных гетерогенных почвах.

Таким образом, многие исследователи продемонстрировали эффективность скейлинга в моделировании влияния почвенной гранулометрической неоднородности на гидрофизические процессы в почвах. Вместе с тем физическая природа нормальности распределения логарифмов масштабных коэффициентов никак не интерпретировалась. Это ясно из того, что авторы использовали полуэмпирические формулы, а подгонка аналитических функций WRC к экспериментальным данным проводилась без физического обоснования. Основываясь на том факте, что почвы имеют логнормальное распределение частиц по размерам, в работе [20] была доказана правомерность точно такого же распределения для коэффициентов масштабирования. Пачепский [24], используя теорию фракталов, получил фрактальную размерность почвенных пор в предположении о логнормальном распределении радиусов капилляров порового пространства. В работе российских ученых [5] используется модифицированная фрактальная модель для описания ветви десорбции ОГХ. Появление публикаций, использующих теорию фракталов, на взгляд авторов настоящей статьи, неслучайно. Метод фракталов плодотворно применяется почвоведом в разделах, связанных с гетерогенными почвенными средами.

В настоящем исследовании делается попытка оценить влияние неоднородности профилей субстратов лизиметров, возникающей от изменчивости гранулометрического состава, на их гидрофизические параметры и процессы влагопереноса. Использовалась приведенная в работах [20, 22, 27, 31] процедура моделирования функции ОГХ. Базовую ОГХ получали осреднением ее параметров с помощью масштабирования кривых вододержания почв с различным ГС.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Масштабирование водоудерживающей способности, в результате которого определяются средние значения и дисперсии масштабных коэффициентов, отражает изменчивость в гранулометрическом составе реального почвенного слоя более информативно [17, 20, 22]. Приведем некоторые результаты и основные положения метода масштабирования. За основу возьмем изложенные в статье Косуги теорию и методы расчетов [20].

В качестве исходных данных при разработке моделей автор использует гранулометрический состав почв, ассоциируя его с функцией вероятностей нормального распределения логарифмов радиусов почвенных пор в виде цилиндрических капилляров. Плотность распределения вероятностей радиусов r , полученная из ГС, моделирует структуру почвенного порового пространства в виде цилиндрических трубок. Эффективная (приведенная) влажность (насыщение почвы водой) задается в виде: $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, где θ_s и θ_r означают насыщенную и остаточную влажности [3, 10, 20, 22]. Кумулятивная функция распределения вероятностей радиусов капилляров определяет $S_e(r)$ как насыщенность почвы влагой, когда все капилляры с радиусами, равными или меньшими, чем r , заполнены водой. Вместе с тем радиус r капилляра связан с капиллярным давлением влаги $|\psi|$ (капиллярно-сорбционный потенциал) формулой Жюрена [20, 22]: $|\psi| = 2\gamma \cos \beta / \rho g r = A/r$, где γ — поверхностное натяжение, β — краевой угол, ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, A — константа. Для целей данной работы удобнее эту формулу записать в логарифмическом виде:

$$\ln |\psi| = \ln A - \ln r. \quad (1)$$

С учетом формулы (1) функцию $S_e(r)$ можно преобразовать в функцию от давления почвенной влаги $|\psi|$: $S_e(|\psi|)$, которая моделирует водоудерживающую способность. Плотность распределения вероятностей логарифмов радиусов почвенных капилляров используется в дальнейшем по тексту настоящей статьи как результат применения нормально распределенных вероятностей логарифмов капиллярных радиусов порового пространства. В данном приближении $dS_e(\ln r)$ определяет объем капилляров, заключенных в диапазоне изменения логарифмов радиусов от $\ln r$ до $\ln r + d\ln r$. Для капиллярно-сорбционного потенциала величина $dS_e(\ln |\psi|)$ представляет собой объем капилляров, в которых вода удерживается капиллярным давлением в диапазоне от $\ln |\psi|$ до $\ln |\psi| + d\ln |\psi|$. Значения ψ приняты в настоящей статье отрицательными. Ось давлений направлена вниз по оси ординат (отрицательный капиллярно-сорбционный потенциал при ненасыщенном влагосодержании) [20, 30]. Это означает, что величина почвенного давления влаги возрастает при перемещении вниз по оси ординат. Связь между $dS_e(\ln r)$ и $dS_e(\ln |\psi|)$ объединяет физические параметры почвы (радиусы капилляров и капиллярно-сорбционный потенциал влаги), отражая ее способность удерживать воду капиллярно-сорбционным давлением. Эффективную насыщенность (S_e) можно получить из кумулятивной кривой гранулометрического состава, отражающего распределения вероятностей логарифмов радиусов r и давлений ψ . Плотность нормаль-

ного распределения вероятностей по значениям случайной величины $\ln r$ представлена формулой (2):

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

$$f(\ln |\psi|) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln |\psi| - \ln |\psi|_m}{\sigma}\right)^2\right), \quad (2)$$

где $\ln r_m$, $\ln |\psi|_m$ и σ^2 — средние значения и дисперсия логарифмов радиусов. Водоудерживающая способность получается интегрированием:

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

$$S(\ln |\psi|) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln |\psi| - \ln |\psi|_m}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (3)$$

где erfc — дополнительная функция ошибок [9, 20, 22]. Кумулятивные распределения вероятностей (3) описывают лабораторные измерения ОГХ для большинства почв с физическим обоснованным моделированием водоудерживающей способности. Физическая обоснованность вытекает здесь из того, что в качестве исходных данных выступает гранулометрический состав почвенной среды, напрямую связанный с ее гидрофизическими свойствами. Параметр r_m в формулах (2), (3) является среднегеометрическим радиусом капилляров порового пространства и соответствует $S_e(\ln r_m) = 0.5$, а капиллярно-сорбционный потенциал — значение $\ln |\psi|_m$.

В настоящей работе метод Косуги был протестирован на четырех лизиметрах, заполненных субстратом с различным гранулометрическим составом. Содержание глины в субстратах было различным, и согласно текстурной классификации все лизиметры были разделены по следующим гранулометрическим классам: песок (sand) — лизиметры 6 и 7, суглинистый песок (loamy sand) — лизиметр 3, опесчаненный суглинок (sandy loam) — лизиметр 4. Данные ГС по Н.А. Качинскому для каждого слоя профиля были приведены к системе ФАО и использовались при моделировании ОГХ образцов, отобранных послойно через каждые 10 см. При моделировании функции ОГХ использовались кумулятивные кривые логнормальных распределений гранулометрического состава, которые обрабатывались методом обобщенной линейной регрессии с использованием функции `glmfit(...)` пакета MatLab [14, 32]. Оригинальность использования метода обобщенной линейной регрессии для данного случая состоит в том, что подгонка физических параметров, содержащихся в ГС, непосредственно приводит к функции водоудерживающей способности, так как результатом регрессии является статистическая функция распределения вероятностей случайной величины. Приведенная влажность (S_e), как функция

логарифма капиллярного давления почвенной влаги, рассчитывалась по формулам (3), в которых кумулятивная функция вероятности моделируется методом обобщенной линейной регрессии данных ГС.

Для моделирования серии кривых ОГХ, описывающих профиль лизиметра, была составлена скрипт-программа Matlab с циклическими вычислениями. Получены базовые ОГХ по 20–24 точкам (рис. 1). Коэффициенты масштабирования рассчитывались для каждого лизиметра в отдельности. С помощью обобщенной линейной регрессии осуществлялась подгонка кривой интегрального распределения вероятностей радиусов капилляров порового пространства к кумулятивным кривым гранулометрического состава. Минимизация целевой функции в используемой программе `glmfit(...)` позволяет определять параметры функций нормального распределения вероятностей. Вычислялись средние значения $\ln r_{m,i}$

и $\ln |\psi|_{m,i}$ и их дисперсии — σ_i^2 для дискретных глубин профиля ($i = 1, 2, \dots, N$); N — количество образцов в профиле. Предполагалось, что выборка образцов, представляющая лизиметр, репрезентативна и адекватно моделирует ту часть естественного почвенного слоя, где проводятся натурные наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ ОГХ показал, что для лизиметра 7 параметры функции водоудержания имеют меньшие значения средних ($\ln |\psi|_{m,i}$) и (σ_i^2). Это означает, что почвенный каркас субстрата соответствует меньшему капиллярно-сорбционному давлению и разбросу радиусов капилляров порового пространства. Результаты моделирования функций ОГХ для всех слоев профиля приведены на рис. 1.

Из рис. 1с видно, что образцы лизиметра 4 (loam — суглинок) имеют более высокие значения $\ln |\psi|_{m,i}$ и σ_i^2 , чем другие лизиметры. Напротив, функция ОГХ лизиметра 3 имеет меньшее среднее $|\psi|_{m,i}$ с более узким распределением.

Коэффициенты масштабирования и параметры базовых ОГХ представлены в табл. 1. Масштабный коэффициент α_i для радиусов цилиндрических капилляров порового пространства определялся по формуле (4):

$$\alpha_{r,i} = r_{m,i}/r^*, \quad i = 1..N, \quad (4)$$

где i означает номер почвенного слоя, N — число слоев, r^* — параметр базовой кривой (среднее геометрическое на всем семействе функций ОГХ). Профиль лизиметра с вычисленными в каждом слое средними $r_{m,i}$, $\psi_{m,i}$ и дисперсии σ_i^2

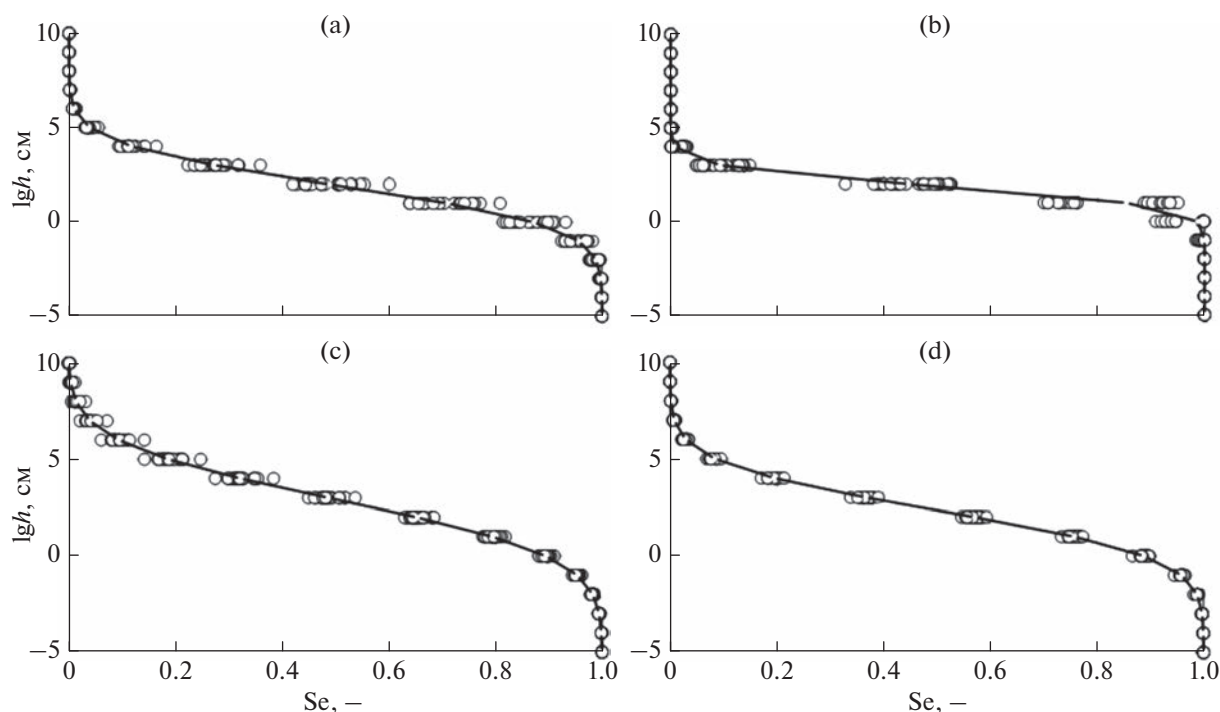


Рис. 1. Масштабирование водоудерживающей способности: а — лизиметр 6; б — 7; с — 4; д — 3; кружки — значения ОГХ, сплошные линии — базовые ОГХ как результат масштабирования.

моделирует подходящую для него некоторую реальную область естественного почвенного слоя, обладающего такими же гидрофизическими параметрами. При вертикальном ненасыщенном влагопереносе в реальной почвенной среде граничные условия от слоя к слою изменяются за счет изменения гидрофизических характеристик почвы. Осреднение этих изменений можно осуществлять с помощью базовой ОГХ (посредством масштабирования), что весьма важно при практическом применении моделирования передвижения влаги.

Было установлено, что коэффициенты масштабирования, сравнивающие водоудерживающую способность отдельных слоев с базовой ОГХ, распределены логнормально так же, как и радиусы почвенных капилляров [12, 20]. На рис. 2а приведена графическая интерпретация этого факта. С помощью статистической функции `normplot(...)` пакета MatLab визуализируется нормальность распределения вероятностей методом линеаризации [32].

На рис. 2б приведены дифференциальные функции распределения вероятностей (плотности распределения) для лизиметра 7, имеющего наиболее узкое распределение (табл. 1) с наименьшим значением σ^2 . Из рисунка очевидна неоднородность профиля с некоторым разделением ГС на две части. На кумулятивных кривых такого разделения не замечено (рис. 1б). Это связано с тем, что кривые накопления вероятностей сглаживают детали дифференциальной кривой ГС.

В программе HYDRUS-1D масштабирование используется для учета разброса гидрофизических параметров почв. Процесс масштабирования сопровождается преобразованием, связывающим текущее значение гидрофизических характеристик $\theta(\psi)$ и $K(\theta)$ отдельных слоев с эталоном [27, 29]. В коде HYDRUS-1D заложены три возможных варианта масштабирования: по почвенному давлению влаги, влажности и гидравлической проводимости. В настоящих исследованиях масштабирование осуществлялось по капиллярно-сорбционному давлению почвенной влаги (ψ):

$$\alpha_{\psi,i} = |\psi|_{m,i} / |\psi|^*, \quad (5)$$

где $\alpha_{\psi,i}$ — масштабный коэффициент капиллярно-сорбционного давления для i -го слоя, $|\psi|^*$ — эталонное значение для базовой ОГХ. Для оценки влияния масштабного эффекта на динамику перемещения влаги в ненасыщенном профиле были разработаны различные модели:

1) однородный почвенный профиль с усредненной водоудерживающей способностью в виде базовой ОГХ (параметры $|\psi|^*$ и σ^{2*} задавались по результатам масштабирования);

2) неоднородный профиль — почвенный профиль, состоящий из различных слоев мощностью 10 см, с параметрами $|\psi|_{m,i}$ и σ_i^2 , рассчитанными из данных ГС;

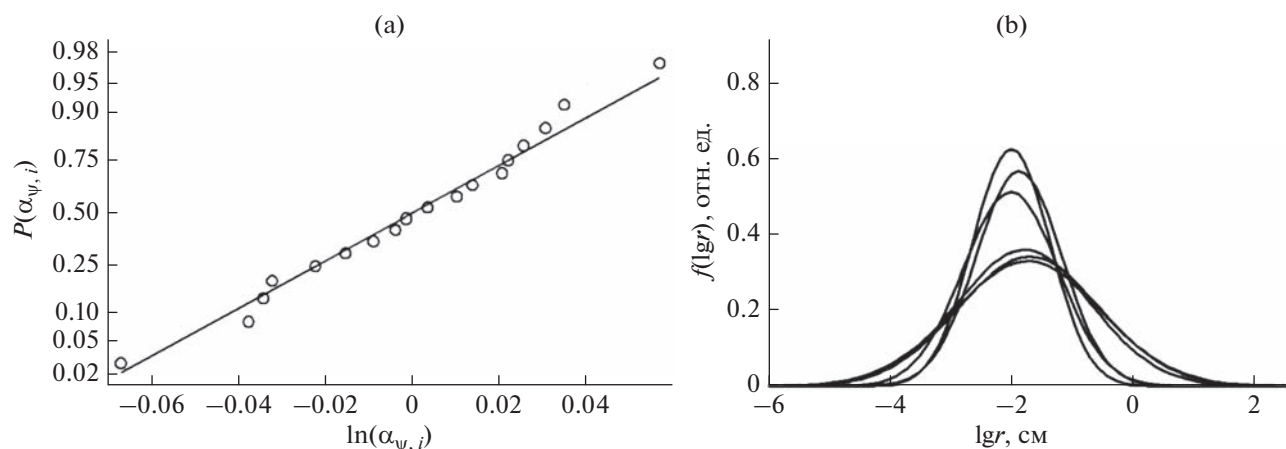


Рис. 2. Иллюстрация гипотезы о нормальном распределении вероятностей логарифмов коэффициентов масштабирования ОГХ по капиллярному почвенному давлению влаги (а); $P(\alpha_i)$ – кумулятивная функция распределения вероятностей для логарифмов коэффициентов масштабирования; функция плотности распределения вероятностей логарифмов радиусов почвенных капилляров для лизиметра 7 (б).

Таблица 1. Коэффициенты масштабирования и параметры базовых ОГХ

Параметр ОГХ	Глубина профиля, см									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	среднее
Лизиметр 3										
$\lg(\psi _{m,i})$	2.368	2.310	2.352	2.362	2.387	2.336	2.346	2.414	2.334	2.357
σ_i^2	0.841	0.815	0.851	0.821	0.857	0.893	0.819	0.845	0.830	0.841
α_i	1.001	0.977	0.994	0.999	1.009	0.988	0.992	1.021	0.987	—
$\alpha_i - \alpha^*$	0.001	-0.023	-0.006	-0.001	0.009	-0.012	-0.008	0.021	-0.013	—
Лизиметр 4										
$\lg(\psi _{m,i})$	2.611	2.615	2.699	2.557	2.596	2.625	2.602	2.551	2.670	2.614
σ_i^2	0.991	1.000	1.039	1.001	0.994	1.004	0.995	1.014	1.051	1.010
α_i	0.997	0.999	1.031	0.976	0.991	1.002	0.994	0.974	1.020	—
$\alpha_i - \alpha^*$	-0.003	-0.001	0.031	-0.024	-0.009	0.002	-0.006	-0.026	0.020	—
Лизиметр 6										
$\lg(\psi _{m,i})$	2.177	2.111	2.127	2.104	2.162	2.312	2.301	2.268	2.264	2.203
σ_i^2	0.743	0.809	0.792	0.755	0.800	0.715	0.734	0.707	0.696	0.750
α_i	0.994	0.963	0.971	0.960	0.987	1.055	1.050	1.035	1.033	—
$\alpha_i - \alpha^*$	-0.006	-0.037	-0.029	-0.040	-0.013	0.055	0.050	0.035	0.033	—
Лизиметр 7										
$\lg(\psi _{m,i})$	2.123	2.110	2.061	2.059	2.018	2.167	2.202	2.194	2.236	2.130
σ_i^2	0.484	0.492	0.537	0.511	0.439	0.320	0.321	0.297	0.329	0.414
α_i	0.991	0.984	0.962	0.961	0.942	1.011	1.028	1.024	1.043	—
$\alpha_i - \alpha^*$	-0.009	-0.016	-0.038	-0.039	-0.058	0.011	0.028	0.024	0.043	—

Примечание. σ^2 – дисперсия, $\lg(|\psi|_{m,i})$ – десятичный логарифм давления влаги в слое, α_i – коэффициент масштабирования i -слоя.

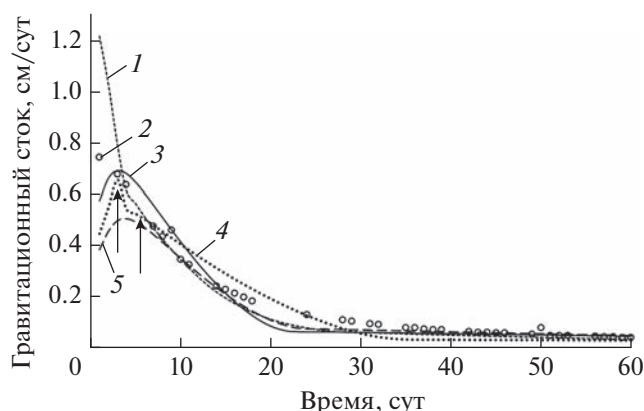


Рис. 3. Интенсивность гравитационного стока на лизиметре 7: 1 – масштабирование в среде HYDRUS-1D; 2 – данные наблюдений; 3 – базовая ОГХ; 4 – модифицированная модель [9]; 5 – неоднородный (слоистый) профиль.

3) масштабирование по алгоритму HYDRUS-1D – слоистый почвенный профиль с параметрами $|\psi|_{m,i}$ и σ_i^2 и коэффициентами масштабирования для каждого слоя;

4) модифицированная модель Терлеева [10] для варианта Косуги, учитывающего аддитивный параметр входа воздуха.

Моделирование влагопереноса в среде HYDRUS-1D проводилось для лизиметра 7 с использованием начально-краевых условий, собранных в период с 10.04.2018 по 19.07.2018 г. Данные по гравитационному стоку использовались для сравнения результатов моделирования. Нижнее граничное условие задавалось в виде свободного дренажа (Free Drainage), верхнее – определялось атмосферными условиями и было переменным (Atmospheric BC with surface layer). Растительность на лизиметре отсутствовала. В результате моделирования были построены зависимости интенсивностей гравитационного стока от времени наблюдений (рис. 3). Для сравнения рассчитывались кумулятивный гравитационный сток и среднеквадратическая ошибка для каждого варианта модели (табл. 2).

Результаты моделирования с использованием базовой ОГХ оказались более близкими к экспериментальным данным, чем другие модели

(RMSE = 0.0377 см/сут). Использование осреднения основных гидрофизических параметров почв по гранулометрическому составу расширяет круг задач с моделями ненасыщенного влагопереноса в неоднородных почвах с размытыми гидрофизическими характеристиками. Для определения чувствительности моделирования к осреднению ОГХ специально выбрали образец с наименьшим разбросом гидрофизических параметров (лизиметр 7). Рис. 3 указывает на некоторое расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования интенсивности гравитационного стока в начале процесса переноса влаги. Это связано со своеобразной динамикой перемещения воды в первые дни после выпадения осадков в достаточно насыщенной влагой почве, когда движение осуществляется по капиллярам больших размеров в режиме, близком к насыщению [25, 28]. Кроме того, HYDRUS-1D предъявляет довольно жесткие требования к корректности задания начально-краевых условий, что приводит к расхождению в начальный период наблюдений. С течением времени эта погрешность, как правило, уменьшается [2].

Если рассматривать динамику передвижения воды во времени, начиная от максимального насыщения в начале наблюдений, то рост скорости обусловлен включением более крупных капилляров в процесс переноса влаги при их освобождении от содержащегося в них воздуха и заполнения водой. По мере заполнения их число после достижения максимального значения будет падать, отражая тем самым капиллярную структуру порового пространства. Для кривых всех вариантов моделирования это следует из рис. 3, где также видно отличие результата моделирования с модифицированной функцией ОГХ Косуги (кривая 4), состоящее в том, что зависимость скорости влагопереноса имеет немонотонный характер с двумя точками перегиба. Этот результат может быть связан с гранулометрическим составом почвенного профиля лизиметра 7 с неоднородной раздвоенной плотностью вероятности распределения почвенных частиц, отмеченных на рис. 2в.

Преимуществом базовой ОГХ является компактность содержащихся в ней параметров. При моделировании влагопереноса в неоднородном профиле следует учитывать изменение этих пара-

Таблица 2. Кумулятивный гравитационный сток (10.04.2018–19.07.2018 гг.) и среднеквадратическая ошибка

Показатель	Лизиметр	Базовая ОГХ	Слоистый профиль	Масштабирование в Hydrus	Модифицированная модель [10]
Кумулятивный внутрипочвенный сток, см	11.80	12.01	11.04	12.11	11.59
RMSE, см/сут	—	0.0377	0.0633	0.0733	0.0546

метров за счет изменения ГС от слоя к слою. При численной реализации уравнения Ричардса в почвенной среде с многослойным профилем возникают проблемы, связанные с тем, что теряется устойчивость решений, затрудняется интерпретация результатов модели, возрастают ошибки численной реализации решения, наблюдается неудовлетворительная сходимость оптимизации целевой функции и т.п. В почвенном профиле для правильной настройки начальных и граничных условий необходимо выделять слои с резким изменением ГС. Метод масштабирования в таких случаях позволяет упростить разработку модели, усредняя неоднородность почвенной среды без снижения качества и ее адекватности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты доказывают эффективность масштабирования при моделировании переноса ненасыщенной почвенной влаги с учетом гранулометрической неоднородности среды. Неоднородность, связанная с гранулометрическим составом, определяющим основные гидрофизические свойства субстратов лизиметров, моделировалась с помощью масштабирования, осредняющего гидрофизические параметры посредством базовой ОГХ. Масштабирование (скейлинг), основанное на концепции Косуги, делает его физически обоснованным, так как базовая кривая водоудерживающей способности, осредняющая параметры гетерогенных почв, формируется непосредственно из гранулометрического состава с последующей обработкой распределения вероятностей логарифмов капиллярных радиусов порового пространства. Приведенная в статье концепция моделирования имеет адекватную теоретическую интерпретацию масштабирующего фактора, образующего опорную ОГХ для неоднородной по ГС почвы. Подобное масштабирование позволяет обосновать математическое моделирование влагопереноса в реальных сельскохозяйственных территориях с адекватным гидрофизическим описанием почвенного слоя. Это обстоятельство весьма важно в практическом отношении, особенно для задач мелиорации, изучения динамики водного баланса агроландшафтов, управления водными ресурсами в целом и т.п. Физическое масштабирование может быть использовано для теоретических исследований причин пространственной изменчивости почв.

На относительно однородных (гомогенных) участках почвенного горизонта такого усреднения не требуется. Тем не менее в работе показано, что даже для лизиметра с наименьшей дисперсией вероятностей распределений капилляров по размерам замечено увеличение точности моделирования с учетом осреднения ОГХ. Когда встречаются гетерогенные (неоднородные) почвы, то

необходимость использования базовой кривой водоудерживания более очевидна. Физическая обоснованность и адекватность масштабирования реальна, однако иногда требует дополнительных исследований, связанных с макроструктурой почв, которую следует учитывать при вертикальном дренаже в режимах, близких к насыщению.

Весьма важно в контексте уточняющих теоретических положений Ван Генухтена и Косуги, изложенных в работах [9, 10], на примерах модели MVG-КТ отметить, что подобные уточнения утверждают концепцию масштабирования. Это обусловлено тем обстоятельством, что гидрофизические параметры модели отражают скейлинг напрямую через гранулометрический состав. Изменение ОГХ при учете давления входа воздуха должно повлиять на форму базовой кривой водоудерживающей способности, что, естественно, приведет к деформации кривых водоудерживания и изменению результатов моделирования. Все это стимулирует дальнейшие исследования динамики влагопереноса в ненасыщенных почвах в режимах увлажнения и иссушения с учетом гистерезиса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания 122020100450-9 “Разработка новой методологии оптимального управления биоресурсами в агроландшафтах засушливой зоны РФ с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, комплексной оценки влияния климатических изменений и антропогенных нагрузок на агробиологический потенциал и лесорастительные условия”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Санжаров А.И., Фригидов Р.А., Дикарев Д.В., Корнеев Ю.Н., Коровин С.В., Саруханов А.В., Томсон А.В. Изучение подвижности и биологической доступности цинка в почве с использованием ^{65}Zn в условиях вегетационного лизиметрического эксперимента // Почвоведение. 2022. № 4. С. 428–444. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22040037>
2. Болотов А.Г., Шеин Е.В. Влияние верхнего граничного условия на точность расчета режима влажности почв в имитационном моделировании // Почвы — стратегический ресурс России: Тез. докл. VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Сыктывкар, 2021. С. 8–10.

3. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 427 с.
4. Дмитриев Е.А. Понятие о неоднородности почв // Масштабные эффекты при исследовании почв. М., 2001. С. 8–39.
5. Мусеев К.Г., Терлеев В.В. Применение фрактального моделирования в гидрофизике почв // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 3(31). С. 125–136.
6. Салугин А.Н., Балкушкин Р.Н. Масштабирование гидрофизических свойств почвогрунтов крупногабаритных лизиметров ФНЦ агроэкологии РАН // Почвенно-экологические исследования окружающей среды лизиметрическими методами. М., 2021. С. 113–121.
7. Салугин А.Н., Мелихова Е.В., Рыжова Т.А. Масштабирование гидрофизических характеристик почвогрунтов // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 8–12.
<https://doi.org/10.31857/S2500262722020028>
8. Смагин А.В. К термодинамической теории водоудерживающей способности и дисперсности почв // Почвоведение. 2018. № 7. С. 836–851.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18070092>
9. Терлеев В.В., Гиневский Р.С., Лазарева В.А., Топаж А.Г., Дунаева Е.А. Функциональное представление водоудерживающей способности и относительной гидравлической проводимости почвы с учетом гистерезиса // Почвоведение. 2021. № 6. С. 715–724.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21060149>
10. Терлеев В.В., Мишель В., Баденко В.Л., Гусева И.Ю. Усовершенствованный метод Муалема-Ван Генухтена и его верификация на примере глинистой почвы Бейт Нетофа // Почвоведение. 2017. № 4. С. 457–467.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X1704013X>
11. Шейн Е.В. Теоретические основы гидрологии почв в трудах А.А. Роде и современные подходы к описанию движения и равновесия влаги в почвах // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. № 83. С. 11–21.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-83-11-21>
12. Ahuja L.R., Williams R.D. Scaling water characteristic and hydraulic conductivity based on Gregson-Hector-McGowan approach // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. V. 55. № 2. P. 308–319.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1991.03615995005500020002X>
13. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media // Hydrology Paper. 1964. V. 3. P. 1–27.
14. Dobson A. An introduction to generalized linear model. CRC Press LLC, 2002. 221 p.
15. Gardner W.R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution // Soil Sci. Soc. Am. J. 1956. V. 20. № 2. P. 151–153.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1956.03615995002000020003X>
16. Fernandez-Galvez, J., Pollacco J., Lilburne L., McNeill S., Garrick S., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R. Deriving physical and unique bimodal soil Kosugi hydraulic parameters from inverse modelling // Adv. Water Resources. 2021. V. 153.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103933>
17. Kosugi K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention // Water Resources Research. 1994. V. 30. № 4. P. 891–901.
<https://doi.org/10.1029/93WR02931>
18. Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1996. V. 32. № 9. P. 2697–2703.
<https://doi.org/10.1029/96WR01776>
19. Kosugi K. A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore-radius distribution // J. Forest Research. 1997. V. 2. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1007/BF02348255>
20. Kosugi K., Hopmans J.W. Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution // Soil Sci. Soc. Am. J. 1998. V. 62. P. 1496–1506.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1998.03615995006200060004X>
21. Miller E.E., Miller R.D. Physical theory for capillary flow phenomena // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. P. 324–332.
<https://doi.org/10.1063/1.1722370>
22. Nasta P., Romano N., Assouline S., Vrugt J., Hopmans J.W. Prediction of spatially variable unsaturated hydraulic conductivity using scaled particle-size distribution functions // Water Resources Research. 2013. V. 49. P. 4219–4229.
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20255>
23. Nimmo J.R. Modeling structural influences on soil water retention // Soil Sci. Soc. Am. J. 1997. V. 61. P. 712–719.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1997.03615995006100030002X>
24. Pachepsky Ya.A., Shcherbakov R.A., Korsunskaya L.P. Scaling of soil water retention using a fractal model // Soil Sci. Soc. Am. J. 1995. V. 59. P. 99–104.
<https://doi.org/10.1097/00010694-199502000-00003>
25. Pollacco J.A.P., Nasta P., Soria-Ugalde J.M., Angulo-Jaramillo R., Lassabatere L., Mohanty B., Romano N. Reduction of Feasible Parameter Space of the Inverted Soil Hydraulic Parameter Sets for Kosugi Model // Soil Sci. Soc. Am. J. 2013. V. 178. № 6. P. 267–280.
<https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182a2da21>
26. Pollacco J.A.P., Web T., McNeill S., Hu W., Garrick S., Hewitt A., Lilburne L. Saturated hydraulic conductivity model computed from bimodal water retention curves for a range of New Zealand soils // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2017. V. 21. P. 2725–2737.
<https://doi.org/10.5194/HES-21-2725-2017>
27. Rassam D., Simunek J., Mallants D., van Genuchten M.Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media // Tutorial. Adelaide: CSIRO Land and Water, 2018. P. 183.
28. Romano N., Nasta P. How effective is bimodal soil hydraulic characterization? Functional evaluations for predictions of soil water balance // Eur. J. Soil Sci. 2016. V. 67. P. 523–535.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12354>
29. Simunek J., Sejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M.Th. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17,

- HYDRUS Software Series 3. Riverside: Department of Environmental Sciences. University of California Riverside, 2013. 342 p.
30. *Van Genuchten M.Th.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. V. 44. P. 892–898. <https://doi.org/10.2136/SS-SAJ1980.03615995004400050002X>
31. *Van Lier Q de J., Pinheiro E.A.R.* Regarding a Common Misinterpretation of the Van Genuchten α Parameter // *Article in Revista Brasileira de Ciência do Solo.* 2018. V. 42. P. 1–5. <https://doi.org/10.1590/18069657RBCS20170343>
32. MathWorks [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_ (дата обращения 05.09.2022).

Vertical Moisture Transfer Investigation on Lysimeters Taking into Account Substrates Granulometric Heterogeneity

A. N. Salugin¹, and R. N. Balkushkin¹, *

¹*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, 400062 Russia*

**e-mail: balkushkin_r@vfanc.ru*

The issues of soil-hydrophysical support of mathematical models of moisture movement, taking into account the heterogeneity of the soil, due to the spatial change in texture, are considered. The processes of vertical movement of moisture on large-sized lysimeters of the Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences (Volgograd) were studied. The influence of statistical heterogeneity of hydrophysical parameters of lysimeter substrates was studied on models of moisture transfer dynamics and formation of gravity flow developed in the environment of the HYDRUS-1D software package. The change in texture along the vertical profile of the lysimeters and the related variability of the main hydrophysical characteristic (WRC) were taken into account. The granulometric heterogeneity of the substrates was estimated by the scaling method, according to the scale factors of the WRC parameters, assuming a normal probability distribution of the logarithms of the pore space capillary radii between soil particles. The effect of texture on water-holding capacity, boundary and initial conditions, intensity of gravity runoff and cumulative accumulation of moisture was studied.

Keywords: scaling, moisture transfer, the main hydrophysical characteristic, lysimeters