

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 2 / 2026, Vol. 18, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/08NZVN226.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Смирнов, Н. С. Вычислительные модели давления влаги в набухающих почвах для обеспечения геоэкологического мониторинга / Н. С. Смирнов, В. В. Терлеев, К. Г. Моисеев // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/08NZVN226.pdf>.

For citation:

Smirnov N.S., Terleev V.V., Moiseev K.G. Calculating models of moisture pressure in swelling soils for geoeological monitoring. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(2): 08NZVN226. Available at: <https://esj.today/PDF/08NZVN226.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 551:504.06:631.4

Смирнов Никита Сергеевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

Аспирант

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

Аспирант

E-mail: nikita_ssmirnov@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7547-795X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1155743

Терлеев Виталий Викторович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

Профессор

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург, Россия

Доктор сельско-хозяйственных наук, профессор

E-mail: vitaly_terleev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-5174>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=65853

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506101828>

Моисеев Кирилл Геннадьевич

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

Ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией Физики почв

Кандидат сельскохозяйственных наук

E-mail: kir_moiseev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3068-0372>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=89737

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7006120487>

Вычислительные модели давления влаги в набухающих почвах для обеспечения геоэкологического мониторинга

Аннотация. К настоящему времени физика процессов происходящих в сплошных однородных средах вполне разработана. Иное дело при переходе к особым природным телам — почвам образующим педосферу Земли. Почвы формируются в биосфере на пересечении и взаимопроникновении литосферы гидросферы и атмосферы. Это прерывистые, анизотропные среды, и математическое описание физических процессов в них чрезвычайно сложно и зачастую невозможно в полной, интегральной форме. С другой стороны, их можно сопоставить, найдя однозначное соответствие между физическими процессами, происходящими в подобных

средах, осуществив натурное моделирование. При равенстве численных значений критериев подобия в двух разных почвах мы вправе ожидать, что одна почва является моделью другой, а процессы, протекающие в них аналогичны. С другой стороны моделирование совершенно необходимый метод прогноза результатов развития планетарных процессов. Практически невозможно представить себе развитие геоэкологии без применения моделирования для поиска эвристических алгоритмов. Целью настоящей работы является выявление условий взаимно однозначного соответствия водных режимов дисперсных не полностью водонасыщенных почв с переменным поровым пространством в изотермических условиях методами теории подобия и физического моделирования. В работе представлены возможности применения метода анализа размерностей для построения критериев подобия физических процессов, происходящих в педосфере. Методом комбинирования аналитического и эвристического подходов к отбору предикторов сформирована информационная база физических параметров моделей. Построены критерии подобия водных режимов набухающих почв в изотермических условиях. Построено критериальное уравнение.

Ключевые слова: геоэкологические процессы; педосфера; гидрофизика почв; водный режим почв; переменное поровое пространство почв; физическое моделирование; критерии подобия

Введение

Проектирование и строительство дорогостоящих оросительных и дренажных систем их функционирование в изменяющихся климатических условиях при недостатке воды хорошего качества, делают необходимым исследование и моделирование способности почвы сохранять и перераспределять влагу необходимую для получения с/х продукции необходимого объема и качества. Если мы ставим задачей решение ряда экологических и экономических проблем то в исследованиях способности почвы сохранять и перераспределять влагу — водоудерживающей способности и влагопроводности почв — обобщенно водного режима почв, необходим точный (прецизионный) подход. Например, следует использовать точные нормы орошения для экономии дорогостоящего ресурса — воды и последовательного решение проблем связанных с поднятием грунтовых вод (проблемы несущей способности почв) и вторичного засоления грунтовых и речных вод. Прецизионный подход можно развить на основе имитационного (кибернетического) или физического моделирования. Для раскрытия физического смысла выстраиваемых моделей предпочтительнее физическое моделирование. Проблема физического моделирования водоудерживающей способности почв и перераспределения почвенной влаги обусловлена тем, что жидкая фаза почвы находится в поле действия сил различной физической и физико-химической природы [1–3]. Наличие и величина этих сил зависит от конфигурации порового пространства почв. Конфигурация порового пространства почв может быть условно постоянной или переменной, например, в набухающих почвах.

Даже в случае постановки граничного условия — равенства нулю изменения температурного градиента, то есть изотермических условий, в почвах возникает сложный механизм массообмена, влияющий на поля влагосодержания и концентрацию растворенных веществ в зоне аэрации, через которую осуществляется влагообмен почвы с атмосферой. Неудивительно, что исследованию влагопереноса (ВП) в капиллярно-пористых телах (в том числе и почвах) посвящено бесчисленное число работ в самых различных сферах научной и производственной деятельности [4–14].

Процессы ВП в почве (передвижение влаги в переменном поле градиента давления почвенной влаги) описывает упрощенное уравнение Навье — Стокса [15].¹ Система Уравнений Навье-Стокса является базовой в гидродинамике, и применяются в математическом моделировании многих природных явлений и технических задач [5; 11; 12].

Для изотермического влагопереноса в почве уравнение Навье Стокса записывают в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -D^* \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x^2} - \frac{K_{\phi} \cdot \partial P}{\partial x \cdot \gamma} \pm J^*(x; t) / \mu \left[\frac{см^3}{сут} \right]. \quad (1)$$

Здесь:

θ — объемная влажность почв;

D^* — функция диффузности воды;

K_{ϕ} — коэффициент фильтрации влаги;

γ — плотность сложения почвы;

$\frac{\partial \theta}{\partial x}; \frac{\partial P}{\partial x}$ — градиенты концентрации и давления влаги;

J^* — внешние массовые силы (источник/сток).

Для каждого градиента формулируют и записывают в виде уравнений начальные и краевые условия. Полученная система дифференциальных уравнений описывает бесчисленное множество конкретных процессов. Точные решения этой системы имеются только для отдельных частных случаев при ряде упрощающих предпосылок. Иными словами, не смотря на углубленное изучение процессов влагопереноса и большое число исследований на эту тему, модель ВП для систем с переменным поровым пространством, к которым относятся и многие почвы, не построена. Следовательно, не существует и надежного способа прогнозирования изменения влажности почв в условиях непостоянства объема порового пространства почв.

Физическое моделирование закономерностей влагоудержания и переноса влаги в ненасыщенных не мерзлых набухающих почвах, с возможностью дальнейшего переноса полученных данных на подобный природный объект, все еще является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение. В связи с этим, целью настоящей работы является выявление условий взаимно однозначного соответствия водных режимов дисперсных не полностью водонасыщенных почв с переменным поровым пространством в изотермических условиях методами теории подобия и физического моделирования.

Объекты и методы

Определение условий взаимно однозначного соответствия физических процессов в почве на основе построения критериев физического подобия становится необходимым методом исследования ВП. Такое исследование необходимо не только в силу сложности интегрирования исходных гидродинамических уравнений Навье-Стокса и затруднения в построении аналитической модели ВП в почве, но и из-за трудности проведения необходимых достаточно точных многоуровневых измерений отдельных свойств почв, скоростей протекания процессов и т. д. [13]. Поэтому многомасштабные системы, такие как почвы, удобно исследовать методами

¹ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. — Издание 4-е, стереотипное. — М.: Наука, 1988. — 736 с. — («Теоретическая физика», том VI).

моделирования [16]. Что необходимо для точной оценки последующих рисков от реализации мелиоративных и строительных проектов агроэкологических систем [17].

Критерии подобия идентичны по форме алгебраической записи и равны численно безразмерные степенные комплексы определенных групп физических параметров, характеризующих объекты исследования [18].² При моделировании физический смысл критериев подобия, помимо установления взаимно однозначного соответствия объектов заключается в том, что критерии подобия однозначным образом характеризуют переход процесса в физической или физико-химической системе от одной интенсивности к другой в одном объекте.

Существует несколько способов построения безразмерных комплексов — критериев подобия, которыми располагает теория подобия и размерности. Первое, построение критериев подобия на основе дифференциальных уравнений исследуемого процесса. Второе, построение критериев подобия методом интегральных аналогов (на основе интегральных уравнений). Третье построение критериев подобия анализом размерности физических параметров, точнее предикторов, участвующих в исследуемом процессе в том случае, когда его математическое описание неизвестно.² При исследовании и решении задачи физического обеспечения моделирования процесса ВП, первый способ построения критериев подобия для нас затруднен в силу частичной не дифференцируемости исходных уравнений, второй способ построения критериев подобия для нас невозможен, так как мы не располагаем полной системой интегральных уравнений процесса.

Наши знания о процессе ВП в почвах все еще находятся на уровне статистических (регрессионных) моделей; общих физических качественных и полуколичественных представлений позволяющих нам выявить участвующие в процессе параметры и записать полную функциональную зависимость, подлежащую исследованию в общем виде: $f(X_1; X_2; \dots; X_n) = 0$. В любом случае полученный результат представляет собой описательную модель процесса, в которой уже разделены параметры и связи существенные и несущественные [13; 18].

Рассмотрим процесс ВП внутри набухающей почвы. Обычно жидкая фаза почв представляет собой раствор солей разной концентрации, поэтому в качестве определяющих процесс параметров, кроме градиентов давления и температуры, мы должны учитывать параметры, связанные с концентрацией солей и содержание воды в порах почвы также следует выражать через размерность концентрации (моль/см³).

Но в таком случае следует учитывать параметр активности «а» солевого (почвенного) раствора (моль/см³). Процесс ВП начинается при изменении условий равновесия внутри многокомпонентной системы. Полная энергия динамической системы это сумма нескольких слагаемых. Полный потенциал почвенной влаги — сумма трех основных слагаемых [6; 19], изменение полного потенциала почв определяется изменением слагаемых:

$$\sum \partial \phi = \partial \phi_{осм} + \partial \phi_{к-с} + \partial \phi_g. \quad (2)$$

Здесь:

$\partial \phi_{осм}$ — изменение осмотического потенциала почвенной влаги;

$\partial \phi_{к-с}$ — изменение капиллярно-сорбционного потенциала;

$\partial \phi_g$ — изменение гравитационного потенциала почвенной влаги.

² Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А.Веников, Г.В. Веников // 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. — 1984. — 439 с.

Физическое состояние почвенной влаги формируется, соответственно, воздействием, поверхностных, объемных и осмотических сил взаимодействия твердой и жидкой фазы. Поэтому, а также исходя из анализа структуры уравнения Навье-Стокса основными предикторами процесса ВП являются: коэффициент диффузии, плотность сложения (пористость) и удельная поверхность почвы. Существенными предикторами, очевидно, также являются величина поверхностного натяжения раствора и электропроводность почв. Так как осмотическое давление или осмотический потенциал почвенной влаги и расклинивающее давление влаги почв в значительной мере определяются ионно-электростатическими силами и могут быть интегрально определены через величину электрокинетического потенциала почв. Соответственно существенным параметром становится постоянная Фарадея (F) как универсальная константа возможного количества зарядов в единице количества вещества (1 моле). В свою очередь величина поверхностного натяжения σ зависит от химического состава и концентрации растворенного вещества, поэтому при выборе в качестве основных предикторов процесса ВП, активности почвенного раствора, химического потенциала и поверхностного натяжения почвенного раствора, данные предикторы не могут, затем, входить в один критерий подобия. Перечисленные физико-химические, физические и топологические параметры пористой среды, в которой происходит ВП, образуют физико-механическую и электрофизическую систему существенных предикторов процесса, в виде функциональной зависимости: $f(X_1; X_2; \dots; X_n) = 0$ [16; 18]. Итак, имеем полное физическое уравнение процесса влагопереноса в почвах с переменным поровым пространством: $f(F; \xi; \Phi x; \sigma; D; S_o; L; \alpha; \lambda; \gamma) = 0$. Список предикторов процесса представлен в форме таблицы 1.

Таблица 1 — Список предикторов существенных для процесса влагопереноса, обозначения, размерность и формула размерности в международной системе единиц измерения [СИ]. *Источник:*.

Наименование	Обозначение	Размерность система [СИ]	Формула размерности	№п/п
Постоянная Фарадея	F	Кулон/моль	$A \cdot T \cdot \mu^{-1}$	X1
Электрокинетический потенциал	ξ	Вольт	$M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot A^{-1}$	X2
Станд хим потенциал	Φx	Дж/моль	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot \mu^{-1}$	X3
Поверхн натяжение (энергия)	σ	Дж/м ²	$M \cdot T^{-2}$	X4
Коэффициент диффузии влаги	D	м ² /сек	$L^2 \cdot T^{-1}$	X5
Удельная поверхность	S_o	м ² сек ² /кг	L	X6
Характерный линейный размер (толщина водных пленок)	L	м	L	X7
Активность растворенного вещества	α	моль/м ³	$\mu \cdot L^{-3}$	X8
Линейная плотность заряда	λ	кл/м	$A \cdot t \cdot L^{-1}$	X9
Плотность сложения почвы	γ	кг/м ² сек ²	$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2}$	X10

Составлено авторами

В системе [СИ] выбран класс основных единиц измерения: масса [M], длина [L], время [T], сила тока (Амперы) [A], количество вещества моль [μ] всего 5 единиц.

В основе любого количественного исследования лежит принцип абсолютности отношений $f(X_1; X_2; \dots; X_n) = 0$ [16; 18].

Для каждого предиктора записывается формула размерности — выражение размерности предиктора через основные единицы выбранной системы размерностей с соблюдением правила Фурье. Формула размерности электропроводности [дж/кл] в классе единиц: длина [L], масса [M], время [T], сила тока (Амперы) [A], количество вещества — моль [μ], всего 5 основных единиц измерения, записывается в виде (например, для предиктора ξ): $\xi = M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot A^{-1}$; или в логарифмической форме:

$$\lg \xi = \lg M + 2 \lg L - 3 \lg T - \lg A. \quad (3)$$

В виде отношения:

$$\pi = \frac{\xi}{[M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-3} \cdot [A]^{-1}}. \quad (4)$$

Здесь:

π — приведенный комплекс.

В обобщенном виде приведенный комплекс — отношение размерности зависимого предиктора (здесь ξ) к размерности независимых предикторов. Число независимых параметров (k) равно числу основных единиц выбранной системы измерения (n). В общем случае $k \leq n$, число независимых параметров может быть меньше числа основных единиц измерения.

Составляем полную матрицу размерностей из степеней основных единиц измерения (табл. 2), учитывая, что формула размерности каждого предиктора содержит все 5 основных единиц измерения, но некоторые основные единицы, не формирующие размерность данного предиктора, записываются в формуле размерности в нулевой степени.

Таблица 2

Полная матрица размерностей предикторов из степеней основных единиц измерения класса $[M]$; $[L]$; $[T]$; $[A]$; $[\mu]$ системы [СИ]

№п/п	Символьное обозначение	M	L	T	μ	A
1	F	0	0	1	-1	1
2	ξ	1	2	-3	0	-1
3	Φx	1	2	-2	-1	0
4	σ	1	0	-2	0	0
5	D	0	2	1	0	0
6	So	-1	1	2	0	0
7	L	0	1	0	0	0
8	α	0	-3	0	1	0
9	λ	0	-1	1	0	1
10	γ	1	-2	-2	0	0

Составлено авторами

Определяем группу независимых предикторов k (табл. 3). Независимые предикторы — предикторы размерность, которых не может быть получена комбинированием (сложением, вычитанием) формул размерности (строк матрицы) других предикторов. Независимых параметров 5. это: α — активность растворенного вещества; D — диффузивность влаги; L характерный линейный размер системы; σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; λ — линейная плотность заряда. Строим матрицу размерностей независимых параметров:

Таблица 3

Промежуточная матрица размерностей независимых параметров

	M	L	T	μ	A
D	0	2	1	0	0
L	0	1	0	0	0
α	0	-3	0	1	0
σ	1	0	-2	0	0
λ	0	-1	1	0	1

Составлено авторами

Необходимо определить ранг промежуточной матрицы. Получаем квадратную матрицу 5-го порядка, определяем число возможных комбинаций из 5 предикторов по 5 единицам измерения: $C_5^5 = \frac{5!}{5!(5-4)!}$ ($C_5^5 = 1$). Единственный определитель 5-го порядка не равен 0, но

дальнейшее повышение ранга определителя невозможно. Число независимых параметров в данном случае равно числу основных единиц измерения $n = k$.

В таблице 4: представлена полная матрица размерности зависимых параметров

Таблица 4

Полная матрица размерностей зависимых параметров

	M	L	T	μ	A
F	0	0	1	-1	1
ξ	1	2	-3	0	-1
Φ_x	1	2	-2	-1	0
So	-1	1	2	0	0
γ	1	-2	-2	0	0

Составлено авторами

Если определитель 5-го порядка отличен от 0 (в данном случае равен -1) то число критериев подобия равно числу зависимых параметров, или по π — теореме (второй теореме теории подобия), число критериев подобия равно числу всех предикторов процесса за вычетом числа независимых параметров. Мы имеем 5 независимых параметров и, следовательно $(10 - 5 = 5)$, 5 критериев подобия может быть построено.

Выясняем структуру критериев подобия. Для этого необходимо заменить одну строку в матрице независимых параметров на строку с размерностью зависимого параметра. Число сочетаний из 5 независимых параметров с заменой по одной строке в матрице на размерность одного и того же зависимого параметра дает группу из 5 определителей 5-го порядка, по числу возможных комбинаций:

$$C_5^1 = \frac{5!}{1!(5-1)!} = 5. \quad (2)$$

Решение каждого определителя дает нам величину степени, в которой независимый предиктор (размерность которого заменена размерностью зависимого предиктора) входит в состав критерия подобия. Каждая группа определителей (по числу независимых параметров) позволяет нам выяснить структуру одного критерия подобия. Число возможных формульных записей критериев подобия равно сумме всех определителей (5 групп по 5 определителей (= 25)) значение, которых отлично от 0.

Результаты и обсуждение

Чтобы построить критерии подобия, то есть определить степень (α) каждого предиктора, входящего в конкретный приведенный комплекс поступают следующим образом [13]²: строка квадратной матрицы 5-го ранга с размерностью D (табл. 3), заменяется строкой с размерностью X_i (например постоянной Фарадея) и решается получившийся определитель 5-го порядка, реализуется следующий алгоритм представленный в таблице 5.

Получаем 1-й критерий в формульной записи: $F \cdot L^2 \alpha / \lambda$. Такая процедура производится с каждым зависимым предиктором. Итак, построены критерии подобия в форме:

$\pi_1 = F \cdot L^2 \alpha / \lambda$. — распределение зарядов в объеме почвы при данном термодинамическом состоянии системы.

$\pi_2 = \xi \cdot \lambda / L \cdot \sigma$ — отношение электрических и капиллярных сил в почве или отношение объемной энергии жидкой фазы почвы к поверхностной энергии твердой фазы почвы обусловленной силами электрической природы.

$\pi_3 = \Phi x * L * \alpha / \sigma$ — предположительно химический фактор поверхностностей раздела фаз почвы.

$\pi_4 = So * \sigma / L$ — число Mi — известный критерий Мичурина [6].

$\pi_5 = \gamma * L2 / \sigma$ — подобие прочности не сплошных сред состоящих из нескольких фаз разделенных межфазной границей.

Таблица 5

Алгоритм построения критерия подобия для $X_i = F$

	M	L	T	μ	A	
F	0	0	1	-1	1	$\Delta_1 = 0$ $(D)^{\alpha=0}$
L	0	1	0	0	0	
α	0	-3	0	1	0	
σ	1	0	-2	0	0	
λ	0	-1	1	0	1	
D	0	2	1	0	0	$\Delta_2 = -2$ $(L)^{\beta=-2}$
F	0	0	1	-1	1	
α	0	-3	0	1	0	
σ	1	0	-2	0	0	
λ	0	-1	1	0	1	
D	0	2	1	0	0	$\Delta_3 = -1$ $(\alpha)\gamma = -1$
L	0	1	0	0	0	
F	0	0	1	-1	1	
σ	1	0	-2	0	0	
λ	0	-1	1	0	1	
D	0	2	1	0	0	$\Delta_4 = 0$ $(\sigma)^{\gamma=0}$
L	0	1	0	0	0	
α	0	-3	0	1	0	
F	0	0	1	-1	1	
λ	0	-1	1	0	1	
D	0	2	1	0	0	$\Delta_5 = 1$ $(\lambda)^{\varepsilon=1}$
L	0	1	0	0	0	
α	0	-3	0	1	0	
σ	1	0	-2	0	0	
F	0	0	1	-1	1	

Составлено авторами

Вообще говоря, существует 13 форм записи критериев подобия, так как из 25 определителей, 12 определителей равны 0.

Всякая комбинация критериев подобия также критерий подобия поэтому мы можем уменьшить количество критериев подобия, что параметры, которые образуют число π_3 (активности почвенного раствора, химического потенциала и поверхностного натяжения почвенного раствора) не могут входить в один критерий подобия. Поэтому после комбинирования ($\pi_1 * \pi_2$ и π_3 / π_5) получим три критерия подобия:

$$\pi_1 = \xi * F * L * \alpha / \sigma \quad \pi_2 = \Phi x * \alpha / \gamma * L \quad \pi_3 = \gamma * L2 / \sigma$$

Поскольку число π_2 — не является критерием подобия (предикторы Φx и α — взаимозависимы), запишем критериальное уравнение в виде: $\pi_3 = f(\pi_1)$. Функция $\pi_3 = f(\pi_1)$ автомодельна. Данную функцию легко отобразить графически. Моделирование влагопереноса в набухающих почвах значительно упрощается.

Водный режим набухающих почв в изотермических условиях целиком (как показывает произведенный анализ) определяется силами электрической и объемной природы. Для того чтобы одна почва была натурной моделью другой, а состояние влаги (и набухание почв) были подобны, необходимо потребовать, чтобы численные значения критериев π_1 и π_3 в одной почве равнялись численным значениям критериев π_1 и π_3 в другой почве. Из числа π_2 следует:

$\Phi x \cdot \alpha / \gamma \cdot L = C$; $\Phi x = C \left[\frac{\gamma \cdot L}{\alpha} \right]^n$ здесь C — константа и n — степень показательной функции. Если величину Φx отнести к влаге в почве, то химический потенциал преобразуется в величину осмотического потенциала почвенной влаги

Интересно, что после решения определителей величина коэффициента диффузии не вошла ни в один критерий подобия. Очевидно, свойство вязкости жидкостей не существенно. А вот поверхностная энергия почвы и изменение топологической организации пространства, в котором, находится влага, играют важную роль.

Заключение

Моделирование физических процессов необходимо для мониторинга сложных природных явлений, происходящих в биосфере.

Исследование разнообразия физических условий почв, применение принципов физического моделирования методов и правил теории подобия — позволили выявить и построить:

- критерии подобия гидрофизических условий почв с переменным поровым пространством;
- критериальное уравнение (физическую модель) распределения капиллярного давления почвенной влаги, обусловленного электрическими силами в набухающих почвах.

Методом комбинирования аналитического и эвристического подходов к отбору предикторов сформирована информационная база физических параметров моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б.В. Чураев Н.В. Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001277229>.
2. Березин П.Н., Шеин Е.В. Особенности исследования порового пространства набухающих почв. Почвоведение. 1988. № 11. С. 63–67. EDN: TOIGTX.
3. Моисеев К.Г. Критерии физико-механического подобия сопротивления почв размыву / К.Г. Моисеев // Агрофизика. — 2014. — № 4. — С. 7–10. EDN: SYCHBJ.
4. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. — М.: Гостехиздат, 1954 — 296 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005832304>.
5. Судницин И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений / И.И. Судницин // Изд. МГУ. — 1979 — 253 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007638033>.
6. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 427 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001377364>.
7. Zolotarevskaya D.I. Mathematical modeling of relaxation processes in soils. Eurasian Soil Science. 2003. Т. 36. № 4. С. 388–397. EDN: LIGASB.

8. МIRONENKO, Е.В. Водная миграция ионов и солей в почвах. Линейные модели: Материалы по математическому обеспечению ЭВМ / Е.В. МIRONENKO, Я.А. ПАЧЕПСКИЙ; Академия наук СССР, Научный центр биологических исследований, Институт агрохимии и почвоведения. — Пушкино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1981. — 62 с. — (Экомодель; Выпуск 3). — EDN SDGNUJ.
9. Тер-Мартirosян, ЗГ. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений / З.Г. Тер-Мартirosян. — Москва: Стройиздат, 1990. — 199 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001567910>.
10. Пачепский Я.А. Математические модели физико-химических процессов в почвах / Я.А. Пачепский; отв. ред. Д.С. Орлов; АН СССР, Ин-т почвоведения и фотосинтеза. — Москва: Наука, 1990. — 186, [2] с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001538866>.
11. Березин П.Н., Воронин А.Д., Шейн Е.В. Основные параметры и методы количественной оценки почвенной структуры//Почвоведение. 1985. № 10. С. 58–68. EDN: TOJXF.
12. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв / А.В. Смагин // М.: Издательство Московского университета. — 2012 — 544 с. EDN: QXNOHR.
13. Моисеев К.Г., Данилова Т.Н., Терлеев В.В. Физическое обеспечение моделирования процессов образования почвенных солевых корок / К.Г. Моисеев, Т.Н. Данилова, В.В. Терлеев // Таврический вестник аграрной науки. — 2023. — №.4. — С. 124–134; DOI: 10.33952/2542-0720-2023-4-36-124-134.
14. Терлеев В.В., Дунаева Е.А., Гиневский Р.С., Лазарев В.А., Топаж А.Г. Почвенно-гидрофизическое информационное обеспечение прецизионного ирригационного земледелия // Таврический вестник аграрной науки. — 2021. — С. 244–259; DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-244-259.
15. Темам Р. Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ. — 2-е изд. — М.: Мир, 1981. — 408 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001056680>.
16. Гончаров В.Д., Моисеев К.Г. Зависимость параметров набухания агрегатов дерново-подзолистых почв от их свойств. Почвоведение. 2013. № 5. С. 603. DOI: 10.7868/S0032180X13050043; EDN: PYSILD.
17. Козаченко А.П. Обоснование приемов рационального использования, обработки и мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Челябинской области / А.П. Козаченко // Челябинск: Изд-во. Челябинский дом печати. — 1999 — 141 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000613884>.
18. Моисеев К.Г. Определение удельной поверхности почв на основе величины гигроскопической влажности Почвоведение. 2008. № 7. С. 845–849; EDN: JHKUFN.
19. Нерпин, С.В. Зависимость водопотребления растений от физических факторов среды / С.В. Нерпин, Б.Н. Мичурин, М.Г. Саноян // Исследование процессов обмена энергией и веществом в системе почва-растение-воздух / Академия наук СССР. Советский национальный комитет по международной биологической программе, Научный совет по проблемам почвоведения и мелиорации почв, Агрофизический научно-исследовательский институт. Редакционная коллегия: Нерпин С.В., Ревут И.Б., Чудновский А.Ф. — Ленинград: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН "Издательство "Наука", 1972. — С. 5–10. — EDN RMGORX.

Smirnov Nikita Sergeevich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia
E-mail: nikita_ssmirnov@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7547-795X>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1155743

Terleev Vitaly Viktorovich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vitaly_terleev@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-5174>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=65853
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506101828>

Moiseev Kirill Gennadievich

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia
Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: kir_moiseev@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3068-0372>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=89737
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7006120487>

Calculating models of moisture pressure in swelling soils for geocological monitoring

Abstract. By now, the physics of processes occurring in continuous, homogeneous environments has been fully developed. The situation is different when dealing with special natural bodies — the soils that form the Earth's pedosphere. Soils form in the biosphere at the intersection and interpenetration of the lithosphere, hydrosphere, and atmosphere. These are discontinuous, anisotropic environments, and a mathematical description of the physical processes within them is extremely complex and often impossible in a complete, integrated form. On the other hand, they can be compared by finding a one-to-one correspondence between the physical processes occurring in similar environments through natural modeling. If the numerical values of the similarity criteria in two different soils are equal, we can rightfully expect that one soil is a model of the other, and the processes occurring in them are analogous. On the other hand, modeling is an absolutely essential method for predicting the results of planetary processes. It is practically impossible to imagine the development of geocology without the use of modeling to find heuristic algorithms. The aim of this study is to identify conditions for a one-to-one correspondence between the water regimes of dispersed, partially saturated soils with variable pore space under isothermal conditions using similarity theory and physical modeling. The study presents the potential of applying dimensional analysis to construct similarity criteria for physical processes occurring in the pedosphere. A database of physical model parameters was created by combining analytical and heuristic approaches to predictor selection. Similarity criteria for the water regimes of swelling soils under isothermal conditions were constructed, and a criteria equation was developed.

Keywords: geocological processes; pedosphere; soil hydrophysics; soil water regime; variable soil pore space; physical modeling; similarity criteria