

DOI 10.5281/zenodo.10297840

EDN ESHGAE

УДК 631.42.+531.001.362

Моисеев К. Г.¹, Данилова Т. Н.¹, Терлеев В. В.²

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ СОЛЕВЫХ КОРОК

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»;

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Реферат. В связи с климатическими изменениями проблема сельскохозяйственного использования засоленных почв и борьбы с коркообразованием на их поверхности актуальна для всех аридных регионов мира. Моделирование становится необходимым методом исследования засоления почв и коркообразования, но оно бесполезно если не установлены критерии взаимодозначного соответствия между моделью и натурой. В статье определены термодинамические и кинетические факторы, влияющие на развитие напряжений в почве и формирование прочности солевых корок. Построение критериев физического и химического подобия процессов засоления почв составляет суть физического обеспечения моделирования процессов засоления и коркообразования почв. На основе экспериментальных данных Даниловой Т. Н. 2002 и 2011 гг., наших исследований и анализа 2019–2020 гг. построены критерии подобия процессов засоления и коркообразования почв способом создания полных матриц размерности предикторов обобщенного физического уравнения и решения соответствующих определителей. Построено критериальное уравнение процессов засоления почв и указаны рамки планирования эксперимента по исследованию засоления почв. Критериальное уравнение упрощает организацию эксперимента по моделированию коркообразования. Из построенного уравнения следует, что прочность почвенной корки является функцией температуры, при которой происходило её образование. Так, если мы берем почву определенного таксономического типа и физического состояния (например, по предикторам плотности сложения и удельной поверхности), то при постановке эксперимента мы однозначно (до опыта) задаем тип засоления этой почвы, и единственное, что необходимо будет исследовать – это температурную зависимость коркообразования почв. Использованный метод построения критериев подобия относится к группе методов анализа размерности, теории подобия и применяется в тех случаях, когда отсутствует полное математическое описание процесса. Данный метод весьма перспективен для применения в физике почв, так как обеспечивает решение ряда неотложных практических задач при исключительной сложности объекта исследования и необходимости натурального моделирования.

Ключевые слова: теория подобия, анализ размерности, физика почв, засоление почв, коркообразование.

Для цитирования: Моисеев К. Г., Данилова Т. Н., Терлеев В. В. Физическое обеспечение моделирования процессов образования почвенных солевых корок // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 4(36). С. 124–134. EDN: ESHGAE. DOI: 10.5281/zenodo.10297840.

For citation: Moiseev K. G., Danilova T. N., Terleev V. V. Physical support for modelling soil salt crust formation // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2023. No. 4 (36). P. 124–134. EDN: ESHGAE. DOI: 10.5281/zenodo.10297840.

Введение

При интенсивном засолении на дневной поверхности почв, не защищенных растительным покровом, в процессе физического испарения почвенного раствора с

поверхности при усадке и высыхании преимущественно бесструктурных почв формируется солевая корка различной толщины и прочности [1–5]. Часто корка возникает в результате воздействия на почву атмосферных осадков, разрушения почвенной структуры машинами и орудиями, а также в процессах замерзания и оттаивания почв в течение холодного сезона [6]. В аридных и семиаридных регионах мира с выпотным водным режимом почв засоление является источником серьезных проблем национальной экономики. В настоящее время засоление почв становится проблемой регионов с гумидным климатом в связи с ростом поступления в атмосферу загрязняющих веществ техногенного происхождения и требует целенаправленного контроля соблюдения экологических нормативов [7]. Также данная проблема обострилась во всех климатических регионах в связи с техногенным загрязнением осадков, широким орошением ранее не орошаемых земель и влагозарядковыми поливами водой, содержащей соли.

Изучение засоления почв и коркообразования имеет давние традиции в почвоведении [1, 8, 9]. До того, как почвоведение превратилось в самостоятельную отрасль знаний, в различных странах, где развивалось засоление почв, проводились широкие теоретические и практические исследования по описанию, изучению и химической мелиорации засоленных почв [2, 3, 5, 10]. Исследования процессов засоления, коркообразования и практический опыт мелиорации подверженных засолению почв развивались совместно с развитием фундаментальных и прикладных наук [1]. Потребность в количественном описании физико-химических процессов, формирующих генетический профиль засоленных почв и приводящих к образованию солевых корок на их поверхности, не удовлетворена в полной мере до настоящего времени, хотя мы уже многое знаем об условиях формирования почвенных корок [1]. Применение различного рода агротехнологий и агротехнических приемов, способствующих улучшению физико-химических свойств почв и предотвращению образования почвенной корки, требует точного количественного описания процессов коркообразования [1, 11–13]. Такое описание затрудняется не только сложностью системы, которой является почва, но и сложностью проведения необходимых достаточно точных многоуровневых измерений отдельных свойств почв, скоростей протекания процессов и т. д. Поэтому многомасштабные системы, такие как почвы, удобно исследовать методами моделирования [13, 14].

Многочисленность модельных экспериментов по исследованию физико-химических процессов засоления почв заключается в практической значимости даже частичного описания этих процессов для практики орошения, дренажа и бонитировки почв [12]. Проектирование дорогостоящих оросительных и дренажных систем при недостатке воды хорошего качества для орошения и промывок делают моделирование необходимостью [1]. Моделирование становится неотъемлемым методом исследования засоления почв [13] и коркообразования не только для определения перспективной стоимости таких проектов, но и для оценки последующих рисков от реализации данных проектов для агроэкологических систем [7].

Необходимо также отметить, что моделью в данном случае может быть не обязательно искусственно созданный объект. В науках о природе, биологии, почвоведении, геологии часто невозможно построить модель отдельно от природы, но можно выбрать так называемый характерный объект, который будет являться моделью для других изучаемых природных объектов. Такой особый вид моделирования называется натурным. И, к сожалению, при натурном моделировании задача поиска взаимнооднозначного соответствия природы и модели на точном количественном и физическом уровне часто не ставится в явном виде, а исследователи предпочитают статистический многофакторный анализ. Или, выражаясь обобщенно, широко

применяется стохастическое, динамическое и аналоговое моделирование. При этом физическая сущность процессов, происходящих внутри изучаемого объекта остается не раскрытой [14, 15].

Тривиально, моделирование – метод создания вспомогательных объектов (моделей), находящихся в определенном соответствии с изучаемым оригиналом (объектом исследования). Для физического обеспечения моделирования необходимо установить количественное соответствие между параметрами, характеризующими модель, и параметрами оригинала, то есть правила взаимнооднозначного соответствия модели и оригинала – безразмерные комплексы, составленные из размерных параметров – критерии подобия. Критерии подобия позволяют переносить результаты экспериментов с моделью на схожие объекты. Критерии подобия – это идентичные по форме алгебраической записи и равные численно безразмерные степенные комплексы определенных групп физических параметров, характеризующих эти объекты [14, 15]. При натурном моделировании физический смысл критериев подобия, помимо установления взаимнооднозначного соответствия двух объектов, заключается в том, что данные безразмерные комплексы, построенные из размерных физических параметров, 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 [14, 15]. При исследовании и решении задачи физического обеспечения моделирования процесса коркообразования два первых способа построения критериев подобия для нас невозможны, так как мы не располагаем полной системой дифференциальных, и тем более, интегральных уравнений процесса. Наши знания о процессе коркообразования 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 на существенные и несущественные. Правильность содержательного описания объектов зависит от полноты информации, которой располагает исследователь.

Цель исследования – построение критериев физико-химического и термодинамического подобия процессов коркообразования и свойств солевых корок при испарении почвенных растворов, содержащих различные по химическому составу соли с поверхности почв, лишенных растительности.

Материалы и методы исследований

За основу объекта исследования взяты результаты модельных экспериментов по образованию солевых корок, выполненные Даниловой Т. Н. на Терско-Кумских песках [1]. Моделировался различный солевой состав и концентрация заполняющего песок раствора, различная температура испарения «порового» раствора, прочность и толщина образующихся солевых корок [1]. Рассмотрим процесс образования солевой корки на поверхности пористого твердого тела при испарении с этой поверхности солевого раствора, насыщающего поровое пространство. Процесс образования корки на границе двух сред – в данном случае почвы (твердой фазы) и газовой фазы – атмосферы

аналогичен выпадению осадков из насыщенных водных растворов солей при изменении термодинамических условий равновесия внутри многокомпонентной системы. Изменение концентрации раствора приводит к изменению фазового состояния растворенного вещества. Происходит выделение растворенного вещества из раствора и, в частном случае, формирование корки этого вещества различной толщины и прочности на поверхности раздела фаз (поверхности испарения). Химический состав раствора обуславливает растворение и выпадение веществ в осадок, которые сопровождаются термодинамическими эффектами. Изменение внутренней энергии растворяемого (осаждающегося) вещества и растворителя обязательно следует учитывать на первом шаге анализа размерностей – выборе основных предикторов процесса коркообразования. Температура системы, коэффициент диффузии, плотность сложения (пористость) и удельная поверхность почвы обуславливает скорость поступления раствора в зону осаждения. Величина температуры является одним из существеннейших параметров, влияющим на испарение солевого раствора. Существенными предикторами, очевидно, также являются прочностные свойства образующейся пленки. На величину прочности образующейся солевой корки в том числе влияет величина поверхностного натяжения раствора на границе с твердой фазой почв, a – температурный коэффициент σ . Поэтому при выборе в качестве основных предикторов процесса коркообразования перепада температуры (ΔK) и поверхностного натяжения солевого раствора, данные предикторы не могут входить в один критерий подобия. Перечисленные физико-химические, физические и топологические параметры пористой среды, содержащей солевой раствор, образуют физико-механическую систему существенных предикторов процесса в виде функциональной зависимости: $f(X_1; X_2; \dots; X_n) = 0$. Учитывая изменения внутренней энергии термодинамической системы «почва–солевой раствор» при формировании корок и универсальную газовую постоянную, имеем полную систему существенных для процесса коркообразования термодинамических и физических предикторов. Итак, имеем полное физическое уравнение процесса коркообразования: $f(R; C; \sigma; \delta; \Delta H; P; T; S_o; \gamma; D; \eta) = 0$. Список предикторов процесса представлен в форме таблицы 1.

Таблица 1 – Список предикторов, существенных для процесса коркообразования, обозначения, размерность и формула размерности в международной системе единиц измерения [СИ]

Наименование	Обозначение	Размерность система [СИ]	Формула размерности	№ п/п
Универсальная газовая постоянная	R	Дж/моль \times К	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot K^{-1} \cdot \mu^{-1}$	X ₁
Концентрация соли в растворе	C	моль/м ³	$\mu \cdot L^3$	X ₂
Поверхностное натяжение (энергия)	σ	Дж/м ²	$L \cdot T^{-2}$	X ₃
Толщина пленки	δ	м	L	X ₄
Тепловой эффект кристаллизации	ΔH	Дж/моль	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot \mu^{-1}$	X ₅
Прочность пленки	P	Па	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	X ₆
Термодинамическая температура	T	К ^o	K	X ₇
Удельная поверхность	S _o	м ² /кг	$M^{-1} \cdot L \cdot T^2$	X ₈
Плотность сложения почвы	γ	Н/м ³	$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2}$	X ₉
Коэффициент диффузии	D	м ² /с	$L^2 \cdot T^{-1}$	X ₁₀
Коэффициент вязкости	η	Пуаз	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$	X ₁₁

В системе [СИ] выбран класс основных единиц измерения: масса [M], длина [L], время [T], термодинамическая температура (градус Кельвина) [K], количество вещества моль [μ] – всего пять единиц.

Такие предикторы, как вязкость раствора, его концентрация, поверхностное натяжение и термодинамическая температура, находятся в тесной корреляционной или функциональной зависимости друг с другом. Поэтому следует сократить список основных предикторов. Наш выбор пал на предикторы «температура» и «поверхностное натяжение раствора», так как это параметры, исчерпывающим образом характеризующие энергетическое состояние раствора соли, предикторы «вязкость» и «концентрация раствора» нами отбракованы.

В основе любого количественного исследования лежит принцип абсолютности отношений [14, 15]. Для каждого предиктора записывается формула размерности – выражение размерности предиктора через основные единицы выбранной системы размерностей. При записи формул размерностей предикторов соблюдаем правило Фурье – размерности всех предикторов должны быть выражены в единой системе измерения. Формула размерности универсальной газовой постоянной R [Дж/К·моль] и в классе единиц: длина [L], масса [M], время [T], термодинамическая температура (градус Кельвина) [K], количество вещества – моль [μ], всего пять основных единиц измерения.

Формула записывается в виде: $R = M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot K^{-1} \cdot \mu^{-1}$; в логарифмической форме:

$$\lg R = \lg M + 2\lg L - 2\lg T - \lg K - \lg \mu.$$

Отношение (например, для R): $p = \frac{R \cdot \mu \cdot K \cdot T^2}{M \cdot L^2}$ или $p = \frac{R}{[M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2} \cdot [K]^{-1} \cdot [\mu]^{-1}}$ – приведенный комплекс. В обобщенном виде приведенный комплекс – это отношение размерности зависимого предиктора (здесь R) 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, учитывая, что формула размерности каждого предиктора содержит все пять основных единиц измерения, но некоторые основные единицы, не формирующие размерность данного предиктора, записываются в формуле размерности в нулевой степени. Например, для коэффициента поверхностного натяжения раствора полная формула размерности записывается: $\sigma = [M]^0 \cdot [L]^1 \cdot [T]^{-2} \cdot [K]^0 \cdot [\mu]^0$

Таблица 2 – Полная матрица размерностей предикторов из степеней основных единиц измерения класса [M], [L], [T], [K], [μ] системы [СИ]

№ п/п	Символьное обозначение	M	L	T	K	μ
1	R	1	2	-2	-1	-1
2	σ	1	0	-2	0	0
3	δ	0	1	0	0	0
4	ΔH	1	2	-2	0	-1
5	P	1	-1	-2	0	0
6	T	0	0	0	1	0
7	So	-1	1	2	0	0
8	γ	1	-2	-2	0	0
9	D	0	2	-1	0	0

Определяем группу независимых параметров k в полной функциональной зависимости: $f(X_1; X_2; \dots; X_k; X_{k+1}; \dots; X_n) = 0$. Данную операцию можно осуществить комбинированием (сложением, вычитанием) логарифмических форм записи формул

размерности каждого предиктора или соответствующих строк полной матрицы. Независимые предикторы – предикторы размерности, которые не могут быть получены комбинированием размерности других предикторов. Находим независимые параметры. Так, например, размерность универсальной газовой постоянной (первая строка) может быть получена разностью четвертой и шестой строк матрицы, а размерность второй строки матрицы – сложением пятой и третьей строк. Размерность коэффициента диффузии или толщины корки солей на почве (девятая и третья строки соответственно) не получается комбинированием других строк матрицы – это независимые параметры. Независимых параметров всего четыре. Это: T (термодинамическая температура), D (коэффициент диффузии), δ (толщина корки солей), ΔH (тепловой эффект кристаллизации). Строим матрицу размерностей независимых параметров:

Таблица 3 – Промежуточная матрица размерностей независимых параметров

	M	L	T	K	μ
ΔH	1	2	-2	0	-1
T	0	0	0	1	0
δ	0	1	0	0	0
D	0	2	-1	0	0

Необходимо определить ранг промежуточной матрицы. Число определителей четвертого порядка рассчитывается: $C_5^4 = \frac{5!}{4!(5-4)!} = 5$. Анализ показывает, что среди них есть определители отличные от 0, но возможно повышение ранга определителя до пятого добавлением в таблицу третьей строки степени размерности произвольно выбранного предиктора. Нас интересует прочность образующейся корки – предиктор P . Получаем квадратную матрицу пятого порядка ($C_5^5 = 1$). Единственный определитель пятого порядка не равен 0, но дальнейшее повышение ранга определителя невозможно. Значит, ранг полной матрицы равен пяти, и имеем группу из пяти параметров. Число независимых параметров в данном случае равно числу основных единиц измерения $n=k$. Полная матрица размерности независимых параметров представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Полная матрица размерностей независимых параметров

	M	L	T	K	μ
ΔH	1	2	-2	0	-1
T	0	0	0	1	0
δ	0	1	0	0	0
D	0	2	-1	0	0
P	1	-1	-2	0	0

Если определитель пятого 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 пять независимых параметров и, следовательно ($9-5=4$), можем построить четыре критерия подобия.

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

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

Данная операция аналогична построению приведенных комплексов следующей структуры:

$$p = \frac{X_i}{[M]^x \cdot [L]^y \cdot [T]^z \cdot [K]^v \cdot [\mu]^u}{}^\alpha$$

Решение каждого определителя дает нам величину степени α , 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 (четыре группы по пять определителей (=20)), значение которых отлично от 0.

Результаты и их обсуждение

Для определения степени α при ΔH строка квадратной матрицы пятого ранга с размерностью ΔH , заменяется строкой с размерностью X_i и решается получившийся определитель пятого порядка. Для построения критерия подобия реализуется следующий алгоритм, представленный в таблице 5:

Таблица 5 – Алгоритм построения критерия подобия для $X_i=R$

	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>T</i>	<i>K</i>	μ	
R	1	2	-2	-1	-1	$\Delta_1=-1, (\Delta H)^{\alpha-1}$
<i>T</i>	0	0	0	1	0	
δ	0	1	0	0	0	
<i>D</i>	0	2	-1	0	0	
<i>P</i>	1	-1	-2	0	0	
ΔH	1	2	-2	0	-1	$\Delta_2=1, (T)^{\beta-1}$
R	1	2	-2	-1	-1	
δ	0	1	0	0	0	
<i>D</i>	0	2	-1	0	0	
<i>P</i>	1	-1	-2	0	0	
ΔH	1	2	-2	0	-1	$\Delta_3=0, (\delta)^{\gamma-0}$
<i>T</i>	0	0	0	1	0	
R	1	2	-2	-1	-1	
<i>D</i>	0	2	-1	0	0	
<i>P</i>	1	-1	-2	0	0	
ΔH	1	2	-2	0	-1	$\Delta_4=0, (D)^{\varepsilon-0}$
<i>T</i>	0	0	0	1	0	
δ	0	1	0	0	0	
R	1	2	-2	-1	-1	
<i>P</i>	1	-1	-2	0	0	
ΔH	1	2	-2	0	-1	$\Delta_5=0, (P)^{\varepsilon-0}$
<i>T</i>	0	0	0	1	0	
δ	0	1	0	0	0	
<i>D</i>	0	2	-1	0	0	
R	1	2	-2	-1	-1	

Получаем первый критерий в формульной записи: $RT/\Delta H$. Такая процедура производится с каждым зависимым предиктором. Итак, построены критерии подобия в форме:

$\pi_1 = RT/\Delta H$ – известное в термодинамике соотношение.

$\pi_2 = \sigma/P\delta$ (или $\sigma/y\delta^2$) – отношение капиллярного давления к гидростатическому или отношение объемной и поверхностной энергии термодинамической системы «пористая среда – солевой раствор».

$\pi_3 = PSo$ – механический фактор удельной поверхности почв.

$\pi_4 = P/y\delta$ – подобие прочности материалов, аналог критерия P/E , здесь E – модуль упругости Юнга.

Вообще говоря, существует семь форм записи критериев подобия, так как из $4 \cdot 5 = 20$ определителей 13 равны 0.

Несомненно, в первую очередь нас интересует толщина и прочность образующейся корки солей на поверхности почвы. Поэтому при составлении критериального уравнения процесса коркообразования в целях моделирования, критерий π_3 выступает в качестве определяемого, а остальные критерии в качестве определяющих. Критериальное уравнение: $\pi_3 = f(\pi_1; \pi_2; \pi_4)$. Всякая комбинация критериев подобия – также критерий подобия, поэтому мы можем уменьшить количество критериев подобия, комбинируя их друг с другом и помня, что температура и поверхностное натяжение раствора не могут входить в один критерий подобия. Поэтому после преобразования получим два критерия подобия:

$$\pi_1 = RT/\Delta H$$

$$\pi_2 = \sigma y S_o / P$$

Запишем критериальное уравнение в виде: $\pi_2 = f(\pi_1)$. Функция $\pi_2 = f(\pi_1)$ автомодельна и ее легко отобразить графически. Моделирование сложнейшего процесса коркообразования значительно упрощается. Из критерия π_2 следует: $\sigma y S_o / P = C; P = C[\sigma y S_o]^n$. Здесь C – константа и n – степень показательной функции.

Уравнение в общем виде для определения прочности образующейся почвенной

корки разного типа засоления и разных почв запишем в виде:

$$P = C[\sigma \cdot y \cdot S_o]^n \cdot f\left(\frac{RT}{\Delta H}\right) \quad (1)$$

Из уравнения 1 очевидно, что прочность почвенной корки прямо пропорциональна природе засоления почв, структурному состоянию и текстуре почв и является функцией температуры, при которой происходило её образование. После решения определителей коэффициент диффузии не вошел ни в один критерий подобия. Очевидно, свойство вязкости раствора не существенно для процесса коркообразования. Уравнение 1 упрощает организацию эксперимента по моделированию коркообразования. Так, если мы берем почву определенного типа и физического состояния (по предикторам y и S_o), то при постановке эксперимента мы однозначно (до опыта) задаем тип засоления этой почвы, и единственное, что необходимо исследовать, это температурную зависимость коркообразования при данном типе засоления почвы.

Выводы

Построены критерии физического подобия процесса коркообразования на поверхности засоленных почв при выпотном водном режиме. В критерии подобия входят константы и переменные, значения которых можно задать априорно, легко определить или рассчитать. Например, универсальная газовая постоянная – физическая константа, тепловой эффект кристаллизации (зависит от химического состава соли) – справочная величина, удельная поверхность и плотность сложения почв легко могут быть оценены по данным грансостава почв, заданы или определены независимо. Неизвестные параметры входят в состав определяемых критериев при решении критериального уравнения и дальнейшего моделирования.

Предложен вниманию метод построения критериев подобия способом создания полных матриц размерности параметров и решения соответствующих определителей. Использованный метод построения критериев подобия относится к группе методов анализа размерности теории подобия и применяется в тех случаях, когда отсутствует полное математическое описание процесса, а решение системы уравнений размерности затруднено по ряду технических соображений. Данный метод весьма перспективен в физике почв при исключительной сложности объекта исследования, большом числе определяющих процесс предикторов и необходимости натурального моделирования для решения ряда неотложных практических задач.

Литература

1. Данилова Т. Н. Физическое моделирование процесса коркообразования почв. Дисс. ... канд. с.-х. н. Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2003. 160 с.
2. Dai Sh., Shin H., Santamarina J. C. Formation and development of salt crusts on soil surfaces // *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11. P. 1103–1109. DOI: 10.1007/s11440-015-0421-9.
3. Toomanian N., Jalalian A., Eghbal M. K. Genesis of gypsum enriched soils in North-West Isfahan, Iran // *Geoderma*. 2001. Vol. 99. No. 3-4. P. 199–224. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00058-6.
4. Zhixin M. O. Effect of salt crust on soil organic and moisture accumulation // *Environmental Protection Science*. 2015. No. 3. P. 120–121.
5. Zhang C., Li L., Lockington D. Numerical study of evaporation-induced salt accumulation and precipitation in bare saline soils: mechanism and feedback // *Water Resources Research*. 2014. No. 50(10). P. 8084–8106. DOI: 10.1002/2013WR015127.
6. Еловская Л. Г. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. М.: Наука, 1966. 274 с.
7. Николаев М. В. Климатические изменения и ведение полеводства в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья России: уязвимость и адаптация // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. №. 1. С. 60–74. DOI: 10.15389/agrobiology.2023.1.60rus.
8. Бреслер Э., Макнил Б. Л., Картер Д. Л. Солончаки и солонцы: Принципы, динамика, моделирование. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 268 с.
9. Пакшина С. М. Закономерности движения и распределения солей в почве. М.: Россельхозакадемия, 1994. С. 87–99.
10. Пачепская Л. Б., Пачепский Я. А., Моргун Е. Г. Использование методов теории размерностей для анализа изменения почвенно-мелиоративных условий при орошении // *Почвоведение*. 1977. №. 12. С. 130–138.
11. Мелихова Е. В. Математическое моделирование солевого режима при фертигации в почвогрунтах фрактальной структуры // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2017. №. 2(46). С. 249–255.
12. Николаенко А. Н. Моделирование и определение параметров физико-химических процессов в почвогрунтах для мелиоративных прогнозов. Автореф. дисс. ... канд. технических наук. М. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им А.Н. Костякова, 1983. С. 18.
13. Пачепский Я. А. Математические модели физико-химических процессов в почвах. М.: Наука, 1990. 186 с.
14. Моисеев К. Г. Критерии физико-механического подобия сопротивления почв размыву // *Агрофизика*. 2014. № 4(16). С. 7–10.
15. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.

References

1. Danilova T. N. Physical modeling of the crust formation process of soils. Diss. ... Cand. Sc. (Agr.). Saint-Petersburg: Agrophysical Research Institute, 2003. 160 p.
2. Dai Sh., Shin H., Santamarina J. C. Formation and development of salt crusts on soil surfaces // *Acta Geotechnica*. 2016. Vol. 11. P. 1103–1109. DOI: 10.1007/s11440-015-0421-9.
3. Toomanian N., Jalalian A., Eghbal M. K. Genesis of gypsum enriched soils in North-West Isfahan, Iran // *Geoderma*. 2001. Vol. 99. No. 3-4. P. 199–224. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00058-6.
4. Zhixin M. O. Effect of salt crust on soil organic and moisture accumulation // *Environmental Protection Science*. 2015. No. 3. P. 120–121.
5. Zhang C., Li L., Lockington D. Numerical study of evaporation-induced salt accumulation and precipitation in bare saline soils: mechanism and feedback // *Water Resources Research*. 2014. No. 50(10). P. 8084–8106. DOI: 10.1002/2013WR015127.
6. Elovskaya L. G. Permafrost saline soils of Central Yakutia. Moscow: Nauka, 1966. 274 p.

7. Nikolaev M. V. The impact of climate change on crop farming in drained lands of the European Non-Chernozem Region of Russia: vulnerability and adaptation assessment // Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2023. Vol. 58. No. 1. P. 60–74. DOI: 10.15389/agrobiol.2023.1.60eng.
8. Bresler E., McNeil B. L., Carter D. L. Saline and alkaline soil: principles, dynamics, modeling. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 268 p.
9. Pakshina S. M. Patterns of movement and distribution of salts in the soil. Moscow: Rosselkhozakademia, 1994. P. 87–99.
10. Pachepskaya L. B., Pachepsky Ya. A., Morgun E. G. Using dimensional theory methods to analyze changes in soil-reclamation conditions during irrigation // Pochvovedenie. 1977. No. 12. P. 130–138.
11. Melikhova E. V. Mathematical modeling of the salt regime at fertigrating in soil fractal structures // Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2017. No. 2(46). P. 249–255.
12. Nikolaenko A.N. Modeling and determination of parameters of physical and chemical processes in soils for reclamation forecasts. Author's abstract diss. ... Cand. Sc. (Techn.). Moscow: All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova, 1983. P. 18.
13. Pachepsky Ya. A. Mathematical models of physical and chemical processes in soils. Moscow: Nauka, 1990. 188 p.
14. Moiseev K. G. Criteria of physico-mechanical similarity for soil resistance to water erosion // Agrophysica. 2014. No. 4(16). P. 7–10.
15. Venikov V. A., Venikov G. V. Theory of similarity and modeling (as applied to problems in the electric power industry): 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Vyschaya shkola, 1984. 439 p.

UDC 631.42.+531.001.362

Moiseev K. G., Danilova T. N., Terleev V. V.

PHYSICAL SUPPORT FOR MODELLING SOIL SALT CRUST FORMATION

Summary. *The issue of agricultural use of saline soils, as well as controlling salt crust formation on their surface, is especially urgent for all arid regions worldwide due to climate change. Modelling is becoming an essential tool for studying soil salinity and crust formation. However, it is useless if criteria for one-to-one correspondence between the model and the real process are not established. In this article, thermodynamic and kinetic factors influencing the development of stresses in soil and the formation of salt crust strength were determined. The construction of criteria for the physical and chemical similarity of soil salinisation processes is the essence of the physical support for modelling the processes of soil salinisation and crust formation. Based on experimental data obtained by Danilova T. N. in 2002 and 2011, as well as our own research and analysis from 2019 to 2020, we constructed similarity criteria for soil salinisation and crust formation processes by creating complete matrices of the predictors' dimensions in a generalized physical equation and by solving the corresponding determinants. A criterion equation for soil salinisation processes was constructed and the framework for planning an experiment to study soil salinity was established. Criterion equation simplifies the organisation of the experiment to simulate crust formation. It follows from the constructed equation that the strength of the soil crust depends on the temperature at which its formation occurred. Hence, if a soil of a certain taxonomic type and physical state (e.g., according to the predictors of density and specific surface area) is taken, then, when setting up the experiment, we unambiguously (before the experiment) set the type of salinisation of this soil, and the only thing to be investigated is the temperature dependence of salt crust formation. The used method for constructing similarity criteria belongs to the group of methods of dimensional analysis and similarity theory in cases when there is no complete mathematical description of the process. This method is very promising in soil physics, as it provides solution of a number of urgent practical problems. This is especially important because of exceptional complexity of the research object and the need for real process modelling.*

Keywords: *similarity theory, dimensional analysis, soil physics, soil salinisation, crust formation.*

Моисеев Кирилл Геннадьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела Биофизики почв Агрофизического научно-исследовательского института. Врио заведующего лабораторией Физики и физической химии почв, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: kir_moiseev@mail.ru.

Данилова Татьяна Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Агроклимата, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: danilovatn@yandex.ru.

Терлеев Виталий Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: Vitaly_Terlev@mail.ru.

Moiseev Kirill Gennadievich, Cand. Sc. (Agr.) leading researcher, Department of soil biophysics; temporary acting head of the Laboratory of physics and physical chemistry of soils, Federal State Budgetary Scientific Institution “Agrophysical Research Institute” (FSBSI ARI); 14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: kir_moiseev@mail.ru.

Danilova Tatyana Nikolaevna, Cand. Sc. (Agr.) leading researcher, Laboratory of agro-climate, Federal State Budgetary Scientific Institution “Agrophysical Research Institute” (FSBSI ARI); 14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: danilovatn@yandex.ru.

Terleev Vitaly Viktorovich, Dr. Sc. (Agr.), senior researcher, professor of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction of the Engineering and Construction Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University” (SPbPU); 29, Politekhnikeskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia; e-mail: Vitaly_Terlev@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 13.10.2023

Дата принятия к печати – 02.11.2023