ФИЗИКА ПОЧВ

УДК 631.432.26

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАКОНА ЛАНДАУ—ДЕРЯГИНА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ХЛОРИДАМИ

Ю.В. Егоров, И.И. Судницын, А.В. Кириченко

Загрязнение тяжелосуглинистого чернозема хлоридами железа, натрия, магния, кальция и водорода (в концентрации 2% от массы почвы) уменьшает его влажность (W, % от массы почвы) в интервале давления почвенной влаги (P) 0,0÷−0,6 атм, что свидетельствует о его деградации. В диапазоне P −0,2÷−0,6 атм между значениями логарифма модуля P (lg $|P|$) и W существует тесная корреляционная связь и, следовательно, регрессионная зависимость (lg $|P_W| = |P_0| - kW$, где $|P_0|$ и k — эмпирически определяемые параметры), аналогичная закону Ландау—Дерягина. Между значениями $|P_0|$ и k существует тесная корреляционная связь и, следовательно, регрессионная зависимость ($|P_0| = 29{,}3k - 0{,}557$). Загрязнение чернозема хлоридами уменьшает величину параметров $|P_0|$ и k, поэтому их величина может быть использована в качестве критериев деградации почвы в результате загрязнения хлоридами.

Ключевые слова: солончак, давление почвенной влаги, влажность почвы, диффузный слой обменно-поглощенных ионов, капилляриметр.

Введение

Поскольку свойства почв определяют продуктивность экосистем, необходимо уметь количественно оценивать, как различные антропогенные факторы влияют на эти свойства. Среди факторов одно из первых мест по значимости занимает загрязнение почв различными химическими реагентами, в том числе хлоридами. Так, почвы, расположенные рядом с промышленными предприятиями, часто загрязняются разными химическими веществами, в том числе хлоридами. Соединения хлора (хлориды натрия, калия и магния), использующиеся в качестве антигололедных реагентов, загрязняют городские почвы, что приводит к ухудшению их качеств, в том числе физических свойств, и снижению плодородия. Общепринятыми критериями оценки негативного влияния химических веществ в качестве токсинов являются ПДК (предельно допустимая концентрация) и ОДК (ориентировочно допустимая концетрация). При загрязнении деформируется важная для плодородия зависимость между влажностью почв и давлением (или потенциалом) почвенной влаги, которая называется основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) [1]. Информативная ценность ОГХ столь велика и использование настолько продуктивно, что до сих пор открываются все новые перспективы ее применения при решении гидрофизических проблем, и поэтому поток посвященных ей исследований не только не ослабевает, но и интенсифицируется [6, 9, 12—18, 20, 21, 23—29]. Необходимо знать, какое влияние оказывает на ОГХ засоление почв (происходящее в том числе и в самых плодородных почвах России — черноземах) при избыточном поливе (в условиях близкого к поверхности залегания засоленных грунтовых вод) или при поливе минерализованной водой, или при попадании в почву стоков промышленных предприятий. Исследование этого влияния проводится уже давно. Некоторые его итоги подвел Е.В. Шеин [15]: «ОГХ несет в себе информацию о многих почвенных свойствах... Физический смысл расклинивающего давления в тонких пленках воды, окружающих почвенные частицы, по природе осмотического характера за счет наличия обменных катионов на поверхности частиц... Если минерализация почвенного раствора будет увеличиваться, толщина двойного диффузного слоя уменьшится, уменьшится и его влияние на расклинивающее давление... Вода не будет “накачиваться” между частицами за счет расклинивающего давления. Кривая ОГХ при засолении сместится... в сторону меньших влажностей». Это смещение приурочено к диапазону pF 1,5—5,4 (что соответствует диапазону давления влаги −0,035÷−250 атм) [15].

Таким образом, физико-химическая сущность этого влияния выявлена, и необходимо перейти к следующему этапу исследований — поиску его количественных критериев. Наиболее перспективным для решения этой задачи является открытая лауреатом Нобелевской премии академиком РАН Л.Д. Ландау и академиком РАН Б.В. Дерягиным экспоненциальная зависимость между модулем давления влаги ($|P|$) и толщиной пленки водного рас-

твора электролита (h), прилегающей к электрически заряженной поверхности твердой фазы [2, уравнение 21']:

$$|P| = |P_0| \cdot e^{-xh}, \quad (1)$$

где e — основание натуральных логарифмов, x — экспериментально определяемый параметр, а P_0 равно P при $h = 0$. Таким образом, P_0 характеризует энергию взаимодействия первоначально сухой твердой фазы с самой первой порцией сорбируемой ею воды. Параметры этого уравнения (P_0 и x) могут быть использованы в качестве критериев негативного влияния засоления на гидрофизические свойства почв (в том числе на ОГХ).

По огромному значению для понимания сущности коллоидных растворов эта зависимость является одним из основных законов природы. Поэтому ее следует именовать законом Ландау—Дерягина. Он был теоретически выведен в 1941 г. [2] на основании гипотезы M. Gouy [22] о существовании экспоненциальной зависимости между концентрацией ионов в диффузном слое и расстоянием от электрически заряженной поверхности твердой фазы. Истинность этого закона была экспериментально подтверждена для глинистых грунтов K. Terzaghi в 1948 г. [29], а для зональных почв европейской территории РФ — И.И. Судницыным в 1966 г. [11]. Для других почв позднее ее подтвердили В.С. Виссер (1969), Е. Чайлдс (1969), А.С. Мак-Куин (1971), А.С. Роговский (1971), А.И. Голованов (1974), Г.П. Белова (1981) и Р. Джонг (1983) (по [1]).

Для почв h в первом приближении пропорциональна их влажности (W), поэтому уравнение (1) может быть записано так:

$$|P| = |P_0| \cdot e^{-BW}. \quad (2)$$

Логарифмируя (2), получим:

$$\lg |P| = \lg |P_0| - BW. \quad (3)$$

Преимущество закона Ландау—Дерягина для анализа ОГХ заключается в том, что он позволяет (путем логарифмирования) линеаризовать нелинейную зависимость P_W от W, тем самым существенно облегчая сравнение ОГХ разных почв, поскольку для исчерпывающего описания линейных функций достаточно знать величину всего лишь двух экспериментально определяемых параметров (в случае ОГХ это $\lg |P_0|$ и B), в то время как для ОГХ количество этих параметров должно быть больше двух (как минимум).

В данной статье обсуждаются результаты анализа экспериментальных исследований влияния соединений хлора на ОГХ чернозема в диапазоне капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги $-0{,}05 \div -0{,}6$ атм (в дальнейшем для краткости изложения вместо термина «капиллярно-сорбционное давление» будет употребляться термин «давление») с использованием закона Ландау—Дерягина.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на образце гумусово-аккумулятивного горизонта тяжелосуглинистого мелкопесчано-крупнопылеватого чернозема обыкновенного, взятого на опытном поле Научно-исследовательского института сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева. Для элиминирования воздействия механической обработки почвы, разрушающей не только ее структуру, но и микроструктуру, образец для исследований взят ниже пахотного слоя и плужной подошвы (глубина 30—40 см).

Гранулометрический состав почвы (табл. 1) определяли при помощи лазерного дифракционного анализатора «Analysette 22 comfort». Перед этим ее образец обработали 4%-м $Na_4P_2O_7$, а затем диспергировали на ультразвуковом приборе «Branson-25». Распределение частиц по размеру устанавливали методом обратной оптики Фурье с помощью лазерного сходящегося луча с длиной волны 632,8 нм. Содержание гранулометрических фракций рассчитывали путем использования теорий Фраунгофера или Ми.

Содержание органического углерода в почве определяли при помощи экспресс-анализатора АН-7529. В исследуемом образце оно было равно 2,1% от массы почвы, что приблизительно соответствует содержанию гумуса, равному 3,5%.

Гидрофизические свойства почв изучали в вакуумных устройствах (капилляриметры), в которых по оси цилиндрических стаканов (диаметр 50 мм, высота 80 мм) находились цилиндрические керамические тонкопористые фильтры (диаметр 15 мм, высота 80 мм), соединенные с вакуумной системой через стеклянные измерительные бюретки [1, 11].

За сутки до начала измерений каждый образец почвы (масса 450 г) равномерно увлажняли порцией водного раствора (объем 180 мл) одного из хлоридов (натрий, кальций, магний, железо или водород). Концентрация каждого из хлоридов составила 2% от массы почвы, и, следовательно, концентрация ионов хлора в почве в этих вариантах опыта достигла 1,20, 0,94, 1,50, 1,32 и 1,94% от массы почвы соответственно. Согласно общепринятой классификации по степени засо-

Таблица 1

Содержание фракций элементарных почвенных частиц разного размера (мкм), % от массы почвы

<1 мкм	1—5	5—10	10—50	50—250	>250	<10 мкм
5,22	31,40	12,06	33,85	16,76	0,71	48,68

ления токсичными солями, все почвы, содержащие ионы хлора в концентрации, превышающей 0,7%, имеют высокий уровень засоления (т.е. являются солончаками) [4]. Следовательно, во всех вариантах проведенного нами опыта почва была солончаковатой.

Через сутки (время, необходимое для протекания процессов катионного обмена в центральной части микроагрегатов) почву очень осторожно (чтобы не разрушить структуру), маленькими порциями переносили в стаканы и уплотняли легким постукиванием по резиновой пластине. В результате их плотность становилась равной 1,0 г/см^3, что соответствовало оптимальному значению плотности для суглинистых и глинистых почв [15]. Затем почву увлажняли до полной влагоемкости (60% от массы), после чего в вакуумной гидравлической системе последовательно создавали уровни разрежения, соответствующие равновесному давлению почвенной влаги (–0,05, –0,1, –0,2, –0,3, –0,4, –0,5 и –0,6 атм). Под влиянием перепада давления вода из почвы перетекала в измерительные бюретки до достижения равновесного состояния. По количеству поступившей воды рассчитывали среднюю влажность почвы (в процентах от массы почвы), соответствующую каждому из этих семи уровней давления. Все измерения проводили в 3-кратной повторности, что позволило обеспечить их необходимую точность (ошибка средних значений влажности почв не превышала ±0,1%).

В результате отсасывания почвенного раствора влажность образцов почвы уменьшилась с 60 до 21,3—24,3% (табл. 2), т.е. в 2,8—2,5 раза, и вследствие этого некоторое количество соединений хлора вышло вместе с отсасываемым почвенным раствором, что привело к уменьшению концентрация иона хлора (в процентах от массы почвы). Но даже при загрязнении почвы соляной кислотой и при наименьшей ее влажности (21,9%) концентрация иона хлора в ней по-прежнему превышала 0,35%, т.е. почва оставалась сильнозасоленной [4].

Полученные данные обрабатывали статистическими методами [3] при помощи сертифицированной компьютерной программы STATISTICA (версия 6.1).

Результаты и их обсуждение

Во всех вариантах опыта по мере снижения уровня давления с –0,05 до –0,6 атм (что соответствует диапазону pF 1,70—2,78) влажность почвы непрерывно уменьшалась (табл. 2). При давлении –0,05 атм влажность почвы, засоленной хлоридами железа, была самой высокой — 48,3%, уменьшаясь в ряду: незасоленная почва (48,3%) > хлориды кальция (46,5%) > магния (46,2%) > натрия (45,1%) > водорода (40,6%).

Таким образом, в диапазоне pF 1,7—2,78 (который является фрагментом более широкого диапазона pF 1,5—5,4, указанного Е.В. Шеиным [15, рис. VII.7]) влажность чернозема при внесении хлоридов уменьшилась (за исключением хлорида железа в диапазоне pF 1,7—2,0), что подтвердило вывод Шеина о том, что «кривая ОГХ при засолении сместится... в сторону меньших влажностей» [15].

Диапазон падения влажности при снижении давления с –0,05 до –0,6 атм также уменьшался в ряду: хлорид железа (27,1%) > незасоленная почва (24,0%) > хлорид кальция (23,6%) > магния (22,8%) > натрия (21,7%) > водорода (19,3%) (табл. 3).

Энергия гидратации этих катионов образует почти такую же последовательность: катионы железа (4355 кДж/моль) > кальция (1580 кДж/моль) > натрия (398 кДж/моль) [5, 12]. В той же последовательности располагаются катионы и по числу молекул воды, «связываемых» катионами при их гидратации: каждый катион кальция и магния связывает в среднем 22 молекулы воды, натрия — 8, а протон — только одну молекулу [5].

Таким образом, эти данные подтверждают гипотезу о том, что в этом диапазоне давления поч-

Таблица 2

Влажность почвы (% от массы почвы) при разных абсолютных значениях (модулях) капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги (|*P*|, атм) и диапазоны влажности почвы, соответствующие разным диапазонам модуля давления (Δ|*P*|, атм)

Соль	|*P*|, атм							Δ|*P*|, атм		
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,05—0,2	0,2—0,6	0,05—0,6
Контроль	48,3	38,7	29,7	27,7	25,5	24,6	24,3	18,6	5,4	24,0
NaCl	45,1	37,4	29,4	27,2	25,0	23,9	23,4	15,7	6,0	21,7
$MgCl_2$	46,2	36,3	29,6	27,5	25,0	24,0	23,4	16,6	6,2	22,8
$FeCl_3$	50,6	38,9	29,3	27,0	24,6	23,6	23,1	20,9	6,2	27,1
$CaCl_2$	46,5	36,4	28,5	26,6	24,2	23,4	22,9	18,0	5,6	23,6
HCl	40,6	32,9	27,8	25,5	22,9	21,9	21,3	12,8	6,5	19,3

Таблица 3

Параметры основной гидрофизической зависимости почв, засоленных хлоридами

Соль	lg ($\lvert P_0\rvert$)	$\lvert P_0\rvert$	k	$-r$	$W_{0,05}$	$W_{0,1}$	W_1	W_2
Контроль	1,75	56	0,080	0,96	36,9	33,1	23,6	14,5
NaCl	1,60	40	0,068	0,97	38,0	34,0	15,7	9,1
$MgCl_2$	1,60	40	0,068	0,97	38,5	34,0	16,6	6,3
$FeCl_3$	1,40	25	0,067	0,96	37,7	33,4	25,5	16,6
$CaCl_2$	1,30	20	0,068	0,96	36,5	32,6	21,5	10,4
HCl	1,20	16	0,065	0,97	35,7	31,9	12,0	3,0

Примечание. lg ($\lvert P_0\rvert$) и k — параметры уравнения lg ($\lvert P_W\rvert$) = lg ($\lvert P_0\rvert$) – kW (1), где W — влажность чернозема (% от массы почвы), P_W и P_0 — давление почвенной влаги (атм) при влажности почвы, равной W, и в сухой почве; r — коэффициент корреляции между lg ($\lvert P_W\rvert$) и W; $W_{0,05}$ и $W_{0,1}$ — влажность почвы при P_W, равном –0,05 и –0,1 атм, рассчитанная по уравнению (1); W_1 и W_2 — относительное содержание почвенной влаги, удерживаемой капиллярными силами, при P, равном –0,05 атм (W_1) и –0,1 атм (W_2), в % от всей влаги, содержащейся в почве при этих значениях P.

венная влага удерживается в значительной степени благодаря гидратации ионов, содержащихся в диффузном слое обменно-поглощенных ионов. Эта гипотеза была предложена Х.З. Янертом (1934), И.Н. Антиповым-Каратаевым (1935), Ф. Альтеном и Б. Курмисом (1935, 1939), С. Маттсоном (1938), П. Фагелером (1938) и другими исследователями [5].

Статистический анализ полученных экспериментальных данных показал, что для всех вариантов опыта в диапазоне давления почвенной влаги от –0,2 до –0,6 атм между значениями влажности почвы и логарифма модуля давления существует весьма тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции равен $-0{,}96 \pm 0{,}15$ при уровне значимости < 0,05) (табл. 3). Это означает, что с вероятностью 95% варьирование влажности на 92% связано с варьированием давления и лишь на 8% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо [3].

Наличие весьма тесной корреляционной связи свидетельствует о существовании в этом диапазоне капиллярно-сорбционного давления линейной регрессионной зависимости между логарифмом модуля давления (lg $\lvert P_W\rvert$) и влажностью почвы (W). Эта зависимость с высокой достоверностью совпадает с теоретически выведенным законом Ландау—Дерягина (3) [2]:

$$\lg |P_W| = \lg |P_0| - BW,$$

где W — влажность почвы (% от массы почвы); P_W — давление влаги (атм) при влажности почвы, равной W; lg $\lvert P_0\rvert$ и B — эмпирически определяемые параметры.

Безразмерный параметр lg $\lvert P_0\rvert$ является пределом, к которому стремилась бы величина lg $\lvert P_W\rvert$ при приближении значения W к нулю, если бы зависимость (3) сохранялась вплоть до $W = 0$. Прямые экспериментальные методы определения величины параметра lg $\lvert P_0\rvert$ отсутствуют, поэтому он вычисляется на основании данных о величине влажности почвы при различных уровнях давления. В незасоленной почве величина lg $\lvert P_0\rvert$ равна 1,75 (что соответствует $P_0 = -56$ атм), но в результате засоления она уменьшилась: при засолении хлоридами натрия и магния — до 1,6 ($P_0 = -25$ атм), хлоридом железа — до 1,4 ($P_0 = -40$ атм), хлоридом кальция — до 1,3 ($P_0 = -20$ атм) и при подкислении почвы соляной кислотой — до 1,2 ($P_0 = -16$ атм) (табл. 3).

Таким образом, полученные данные подтвердили вывод Е.В. Шеина о том, что «кривая ОГХ при засолении сместится... в сторону меньших влажностей» [15, рис. VII.7].

Безразмерный параметр k равен отношению разности логарифмов значений модуля давления влаги (атм) к разности соответствующих значений влажности почв (% от массы почвы). Засоление уменьшило его величину с 0,080 в незасоленной почве до 0,067—0,068 — в засоленной и до 0,065 — в почве, подкисленной хлористым водородом (табл. 3). Следовательно, кривая ОГХ не только «смещается... в сторону меньших влажностей», но и увеличивается угол ее наклона к абсциссе графика, на которой откладывается влажность почвы.

Статистический анализ полученных данных показал, что оценка ошибки среднего значения k равна $\pm 0{,}0005$. Следовательно, оценки значений этого параметра для почвы незасоленной, засоленной и обработанной соляной кислотой достоверно отличаются друг от друга.

Между значениями параметров lg $\lvert P_0\rvert$ и k существует тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции равен $0{,}75 \pm 0{,}38$ при уровне значимости < 0,05). Наличие тесной корреляцион-

ной связи свидетельствует о существовании регрессионной зависимости [3]:

$$\lg |P_0| = 29{,}3k - 0{,}557. \quad (4)$$

Подставив значение $\lg |P_0|$ из уравнения (4) в уравнение (3), получим:

$$\lg |P_W| = (29{,}3k - 0{,}557) - kW = \\ = k(29{,}3 - W) - 0{,}557 \quad (5)$$

или, соответственно,

$$k = (\lg |P_W| + 0{,}557)/(29{,}3 - W), \quad (6)$$

где P_W выражена в атмосферах, а W — в процентах от массы почвы.

Если экспоненциальная зависимость (3) окажется репрезентативной для каких-либо диапазонов давления влаги и в других почвах, то, определив экспериментально всего одну пару соответственных его значений и влажности почвы, можно будет по уравнению (6) рассчитать величину параметра k. Зная величину k, по уравнению (4) можно рассчитать и величину $\lg |P_0|$, а зная величины k и $\lg |P_0|$, можно по уравнению (1) рассчитать величины влажности при любых значениях давления влаги (конечно, только в пределах тех диапазонов их значений, в которых выдерживается экспоненциальная зависимость между ними).

Пока еще не существует прямого метода определения того, какая часть влаги при давлении, равном –0,05 и –0,1 атм, удерживается гидратированными ионами их диффузного слоя около электрически заряженной поверхности твердой фазы почвы, а какая — капиллярными силами. Однако можно попытаться определить это косвенным методом, основанным на результатах исследований J.G. Falconer и S. Mattson, которым удалось обнаружить, что в почвенных суспензиях (где нет воздуха, а значит, нет и капиллярных менисков на границе жидкой и газовой фаз, и, как следствие этого, отсутствует капиллярное давление влаги) экспоненциальная зависимость между их влажностью и давлением влаги сохраняется в диапазоне –0,6—0 атм [12, 19]. Поскольку гидратация ионов диффузного слоя происходит как при наличии, так и при отсутствии капиллярных явлений, то можно по уравнению (1) рассчитать, сколько влаги при данном давлении удерживается ионами. Тогда по разности между всей влагой и влагой, связанной гидратированными ионами, можно рассчитать, сколько влаги удерживается капиллярными силами.

В проведенном нами эксперименте на незасоленной почве при давлении, равном –0,05 атм, влажность была равна 48,3% (табл. 2). Расчеты по уравнению (1) показали, что при этом давлении гидратированные ионы, по-видимому, удерживали 36,9% воды (табл. 3). Следовательно, капилляры удерживали 48,3% – 36,9% = 11,4% воды (т.е. всего лишь 11,4/48,3 = 23,6% от всей влаги, содержащейся в почве при этом уровне давления).

Соответственно при давлении, равном –0,1 атм, влажность незасоленной почвы была равна 38,7%, и на долю капиллярной влаги приходилось 5,6%, т.е. всего лишь 14,5% от всей влаги, содержащейся в почве при этом уровне давления (назовем эту величину *относительным содержанием капиллярной влаги*) (табл. 2 и 3).

Если эта гипотеза справедлива, то называть всю влагу, содержащуюся в почве при давлении –0,05 и –0,1 атм, капиллярной, некорректно, так как значительная ее часть удерживается, по-видимому, сорбционными силами (в результате гидратации ионов, находящихся в их диффузном слое).

Относительное содержание капиллярной влаги было минимальным при обработке почвы соляной кислотой (12 и 3% при давлении –0,05 и –0,1 атм), несколько большим — при засолении ее хлоридами натрия и магния (соответственно, 15,7 и 16,6% при –0,05 атм; 9,1 и 6,3% — при –0,05 и –0,1 атм), еще большим — при засолении хлоридом кальция (21,5% при –0,05 атм и 10,4% — при –0,1 атм) и максимальным — при засолении хлоридом железа (25,5% при –0,05 атм и 16,6% — при –0,1 атм). По-видимому, это вызвано тем, что соляная кислота диспергирует (пептизирует) почву, что вызывает разрушение микроагрегатов и, следовательно, исчезновение капилляров, диаметр которых превышает 15 мкм (что соответствует давлению влаги, равному –0,2 атм). Катионы кальция (а тем более железа), напротив, приводят к формированию структурных агрегатов, пронизанных капиллярами такого диаметра. В обменном поглощающем комплексе незасоленного чернозема преобладают катионы кальция и железа, поэтому он и занимает промежуточное положение между образцами почвы, ими засоленной.

Таким образом, проведенные исследования позволили уточнить характер влияния соединений хлора на основную гидрофизическую характеристику чернозема, качественные закономерности которого были раскрыты Е.В. Шеиным [15]. Подтверждено также существование экспоненциальной зависимости между давлением влаги и влажностью почвы, теоретически обоснованной академиками РАН Л.Д. Ландау и Б.В. Дерягиным (закон Ландау—Дерягина») [2], а затем экспериментально подтвержденной K. Terzaghi [29] и другими исследователями.

Выводы

- Внесение в гумусово-аккумулятивный горизонт тяжелосуглинистого чернозема хлоридов нат-

рия, магния, кальция и водорода (в концентрации 2% от массы почвы) уменьшает его влажность в интервале капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги −0,05——0,6 атм.

• В диапазоне давления влаги −0,2——0,6 атм между значениями логарифма модуля давления влаги ($\lg |P_W|$) и влажностью чернозема (W) впервые выявлена весьма тесная корреляционная связь и, следовательно, регрессионная зависимость ($\lg |P_W| = \lg |P_0| - kW$, где $\lg |P_0|$ и k — эмпирически определяемые параметры), аналогичная закону Ландау—Дерягина.

• Хлоридное засоление чернозема, а также внесение в него соляной кислоты уменьшает величину параметров $\lg |P_0|$ и k, поэтому она может быть использована в качестве критерия деградации почвы в результате загрязнения хлоридами.

Между значениями $|P_0|$ и k существует тесная корреляционная связь и, следовательно, регрессионная зависимость ($\lg |P_0| = 29{,}3k - 0{,}557$).

• При капиллярно-сорбционном давлении влаги, равном −0,05 атм, капиллярные силы удерживают от 12,0 до 25,5% от всей воды, находящейся в почве при этом давлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глобус А.М.* Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л., 1987.

2. *Дерягин Б.В., Ландау Л.Д.* Теория устойчивости сильно заряженных золей и слипания сильно заряженных частиц в растворах электролитов // Журн. эксперимент. и теорет. физики. 1945. Т. 15, вып. 11.

3. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М., 1995.

4. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. М., 1996.

5. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Л., 1965.

6. *Смагин А.В., Манучаров А.С., Садовникова Н.Б.* и др. Влияние поглощенных катионов на термодинамическое состояние влаги в глинистых минералах // Почвоведение. 2004. № 5.

7. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бен-Али.* Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. 1998. № 11.

8. *Судницын И.И.* Влажность почв и влагообеспеченность растений // Почвоведение. 2008. № 1.

9. *Судницын И.И.* Влияние обменных катионов на снижение давления почвенной влаги // Почвоведение. 2006. № 5.

10. *Судницын И.И.* Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М., 1979.

11. *Судницын И.И.* Новые методы оценки водно-физических свойств почв и влагообеспеченность леса. М., 1966.

12. *Судницын И.И., Смагин А.В., Шваров А.П.* Учение Максвелла—Больцмана—Гельмгольца—Гуи о двойном электрическом слое в дисперсных системах и его использование в почвоведении // Почвоведение. 2012. № 4.

13. *Судницын И.И., Шваров А.П.* Зависимость влажности почв от полного давления почвенной влаги // Грунтознавство (Почвоведение). 2009. Т. 10, № 1—2 (14).

14. *Умарова А.Б.* Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М., 2011.

15. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М., 2005.

16. *Boivin P., Garnier P., Vauclin M.* Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2006. Vol. 70, N 4. P. 1082—1093.

17. *Chin K.B., Leong E.C., Rahardjo H.* A simplified method to estimate the soil-water characteristic curve // Can. Geotech. J. 2010. Vol. 47, N 12. P. 1382—1400.

18. *Cornelis W.M.* Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2005. Vol. 69, N 6. P. 1902—1911.

19. *Falconer J.G., Mattson S.* The laws of soil colloidal behavior: XIII. Osmotic imbibition // Soil Sci. 1933. Vol. 36, N 4. P. 317—327.

20. *Fooladmand H.R.* Improvement in estimation of soil-moisture characteristic curve based on soil particle size distribution and bulk density // JWSS-Isfahan Univer. Technol. 2007. Vol. 11, N 41. P. 63—73.

21. *Frydman S., Baker R.* Theoretical soil-water characteristic curves based on adsorption, cavitation, and a double porosity model // Intern. J. Geomech. 2009. Vol. 9, N 6. P. 250—257.

22. *Gouy M.* Sur la constitution de la charge electrique a la surface d'un electrolyte // J. de physique. 1910. Ser. 4, t. 9. P. 457—468.

23. *Haverkamp R.* Soil water retention // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2005. Vol. 69, N 6. P. 1881—1890.

24. *Hillel D.* Soil and water: physical principles and processes. Elsevier, 2012.

25. *Huang G.H., Zhang R.D., Huang Q.Z.* Modeling soil water retention curve with a fractal method // Pedosphere. 2006. Vol. 16, N 2. P. 137—146.

26. *Li A.G.* Comparison of field and laboratory soil—water characteristic curves // J. geot. and geoenv. engineer. 2005. Vol. 131, N 9. P. 1176—1180.

27. *Lu N., Godt J.W., Wu D.T.* A closed form equation for effective stress in unsaturated soil // Water Res. Research. 2010. Vol. 46, N 5.

28. *Marinho F.A.M.* Nature of soil — water characteristic curve for plastic soils // J. geot. and geoenv. engineer. 2005. Vol. 131, N 5. P. 654—661.

29. *Terzaghi K., Peck R.* Soil mechanics in engineering practice. N.Y., 1948.

Поступила в редакцию
30.06.2015

PERSPECTIVES OF USING OF LANDAU—DERJAGIN LAW FOR EVALUATION OF SOIL DEGRADATION AS RESULT OF ITS' CHLORID POLLUTION

Yu.V. Egorov, I.I. Sudnitsyn, A.V. Kirichenko

The chloric salinity of the heavy loamy chernozem decreased the soil moisture content in the interval of the soil moisture pressure (P) −0,05——0,6 atm. The chloric salinity decreased parameters of the linear relationships between values of the logarithm of $|P|$ and the soil moisture content (W) in the interval of P −0,2——0,6 atm (this relationship is the analog of "Landau—Derjagin's Law"). So these parameters may be used as soil degradation criterias.

Key words: solonchak, soil moisture, soil moisture pressure, chloric salinity, soil degradation.

Сведения об авторах

Егоров Юрий Валентинович, мл. науч. сотр. каф. физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* iisud@mail.ru. **Судницын Иван Иванович**, докт. биол. наук, профессор, вед. науч. сотр. каф. физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* iisud@mail.ru. **Кириченко Анатолий Валентинович**, канд. биол. наук, науч. сотр. каф. физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* iisud@mail.ru.