

УДК 631.445.52

Г.П. ЕВГРАШКИНА
Днепропетровский национальный университет
Н.Н. ХАРИТОНОВ

Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ СОЛЕВЫХ РЕЖИМОВ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ

Прогноз солевого режима орошаемых земель является обязательной составной частью комплекса изысканий и исследований для целей мелиоративного строительства, реконструкции оросительных систем в процессе их эксплуатации. Особой темой является оценка риска засоления подовых почв на юге Украины. В основу современных методов прогнозирования солепереноса положена теория физико-химической гидродинамики пористых сред. Согласно этой теории, процессы массопереноса описываются дифференциальными уравнениями движения и сохранения массы вещества второго порядка в частных производных эллиптического и параболического типов. Для решения практических задач используют одномерные варианты этих уравнений. Это объясняется тем, что солеперенос в зоне аэрации проходит преимущественно в вертикальном направлении. Цель исследований: обосновать возможные оптимальные модели вертикального солепереноса на примере орошаемых земель. Объект исследований представлен подовым понижением земной поверхности в Солонянском районе Днепропетровской области. Соответственно сделанным шагам была составлена схема солепереноса. Начало координат было привязано к поверхности земли. Для этого было задано граничное условие III-рода Данквертса–Бреннера. Его физический смысл: количество солей, которое поступает на поверхность земли в процессе орошения, рассеивается в зоне аэрации по законам молекулярной и конвективной диффузии. Определение миграционных параметров выполняем путем решения инверсной задачи. Скорость вертикального влагопереноса определяем балансовым методом. Для определения параметра гидродисперсии засоление определяли в трех точках по вертикали, применив аналитическое решение Веригина. Прогноз солевого режима почв в подовом понижении на территории предполагаемого орошения с засоленностью 0.9% был выполнен с учетом исходных данных. Проведенные расчеты позволили определить значения параметров солепереноса. Согласно выполненным расчетам засоление почвы на поверхности исследуемой территории составит 0.322%. После увеличения оросительной нормы процесс расчета был выполнен снова. Результаты расчета показывают, что при заданном режиме орошения рассоление верхнего метрового слоя (до содержания солей менее 0,25%) в течение 5 лет не произойдет без увеличения оросительной нормы до $3000\text{ м}^3/\text{га}$.

Ключевые слова: математическое моделирование; массоперенос; зона аэрации; водные вытяжки; почвенные растворы; орошаемое земледелие.

Г.П. ЄВГРАШКІНА
Дніпровський національний університет
М.М. ХАРИТОНОВ

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ СОЛЬОВИХ РЕЖИМІВ ЗРОШУВАНИХ ЗЕМЕЛЬ В АРІДНИХ РЕГІОНАХ

Прогноз сольового режиму зрошуваних земель є обов'язковою складовою частиною комплексу досліджень і досліджень для цілей меліоративного будівництва, реконструкції зрошувальних систем в процесі їх експлуатації. Особливою темою є оцінка ризику засолення подових ґрунтів на півдні України. В основу сучасних методів прогнозування солепереносу покладена теорія фізико-хімічної гідродинаміки шпаруватих середовищ. Відповідно до цієї теорії, процеси масопереносу описуються диференціальними рівняннями руху і збереження маси речовини другого порядку в приватних похідних еліптичного і параболічного типів. Для вирішення практичних завдань використовують одновимірні варіанти цих рівнянь. Це пояснюється тим, що солеперенос в зоні аерації проходить переважно у вертикальному напрямку. Мета досліджень: обґрунтувати можливі оптимальні моделі вертикального солепереносу на прикладі зрошуваних земель. Об'єкт досліджень представлений подовим пониженням земної поверхні в Солонянському районі Дніпропетровської області. Відповідно зробленим крокам була складена схема солепереносу. Початок координат був прив'язаний до поверхні землі. Для цього було задано граничну умову III-роду Данквертса-Бреннера. Його фізичний сенс: кількість солей, яке надходить на поверхню землі в процесі зрошення, розсіюється в зоні аерації за законами молекулярної і конвективної дифузії. Визначення міграційних параметрів виконуємо шляхом вирішення інверсного завдання. Швидкість вертикального вологопереносу визначаємо балансовим методом. Для визначення параметра гідродисперсії засолення визначали в трьох точках по вертикалі, застосувавши аналітичне рішення Верігіна. Прогноз сольового режиму ґрунтів в Подовому зниженні на території передбачуваного зрошення з засоленістю 0.9% був виконаний з урахуванням вихідних даних. Проведені розрахунки дозволили визначити значення параметрів солепереносу. Згідно з виконаними розрахунками засолення ґрунту на поверхні досліджуваної території складе 0.322%. Після збільшення зрошувальної норми процес розрахунку був виконаний знову. Результати розрахунку показують, що при заданому режимі зрошення розсолення верхнього метрового шару (до вмісту солей менше 0,25%) протягом 5 років не відбудеться без збільшення зрошувальної норми до 3000м³/га.

Ключові слова: математичне моделювання; масоперенос; зона аерації; водні витяжки; ґрунтові розчини; зрошуване землеробство.

G.P. YEVGRASHKINA

Dnipro National University

M.M. KHARYTONOV

Dnipro State Agrarian and Economic University

AN ENVIRONMENT ASSESSMENT, MODELLING AND FORECAST OF THE SALTED REGIMES OF IRRIGATED ARABLE LANDS IN ARID REGIONS

The forecast of the salt regime of irrigated lands is an obligatory part of the complex of surveys and research for the goals of meliorative building, reconstruction of irrigation systems in the course of their operation. Assessment of the salinization risk of pod soils in the south of Ukraine is a special topic. The theory of physical and chemical hydrodynamics of porous media is the basis for modern methods of predicting salts transfer. Mass transfer processes are described by differential equations of motion and conservation of matter mass of the second order in partial derivatives of elliptic and parabolic types according to this theory. One-dimensional versions of these equations are used for solving practical problems. This is due to the fact that salt transfer in the aeration zone takes place mainly in the vertical direction. The purpose of the research was to substantiate the possible optimal models of the

vertical salt transfer at the example of irrigated land. The object of research is represented by the subgrade of the earth's surface in the Solonyansky district of the Dnipropetrovsk province. The scheme of salts transfer was drawn up according to the steps taken. The origin of the coordinates was linked to the earth's surface. The boundary condition of the III-kind of Danckwerts–Brenner was specified for it. Its physical meaning: the amount of salt that enters the earth's surface during irrigation is dispersed in the aeration zone according to the laws of molecular and convective diffusion. The migration parameters were determined by solving an inverse problem. The rate of vertical moisture transfer was determined by the balance method. Salinity was determined at three vertical points using Verigin's analytical solution to determine the hydrodispersion parameter. The forecast of the soil salt regime in the annual decrease in the territory of the proposed irrigation with a salinity of 0.9% was made taking into account the initial data. The calculations made it possible to determine the values of the parameters of salts transfer. According to the calculations, the salinity of the soil on the surface of the study area will be 0.322%. The calculation process was performed again after increasing the irrigation rate. The results of the calculation show that under a given irrigation regime, the upper meter layer will not be desalinated (when salt content less than 0.25%) for 5 years without increasing the irrigation rate to 3000 m³/ha.

Keywords: mathematical modeling; mass transfer; aeration zone; water extracts; soil solutions; irrigated farming.

Постановка проблемы

Прогноз солевого режима орошаемых земель является обязательной составной частью комплекса изысканий и исследований для целей мелиоративного строительства, реконструкции оросительных систем в процессе их эксплуатации. В основу современных методов прогнозирования солепереноса положена теория физико-химической гидродинамики пористых сред. Согласно этой теории, процессы массопереноса описываются дифференциальными уравнениями движения и сохранения массы вещества второго порядка в частных производных эллиптического и параболического типов. Двух и трехмерные уравнения солепереноса очень трудно обеспечить исходной информацией для решения инверсной задачи по определению миграционных параметров. Для решения практических задач используют одномерные варианты этих уравнений. Это объясняется тем, что солеперенос в зоне аэрации проходит преимущественно в вертикальном направлении. В этом случае можно предложить адекватное аналитическое решение задачи.

Анализ последних исследований и публикаций

Оценка риска засоления подовых почв является актуальной проблемой на юге Украины. Подами называют сравнительно крупные округлые замкнутые депрессии с хорошо выраженными склонами различной крутизны, плоским днищем и сложившейся вокруг них эрозионной сетью [1]. В границах подов формируется большое разнообразие засоленных (галогенных) почв, включая солончаки, солонцы и солоды [2]. Солончаки формируются при наличии неглубокого уровня засоленных грунтовых вод (0,5–1,5 м), а солонцы образуются в случае более глубокого залегания грунтовых вод при доминировании катиона натрия в составе растворимых солей.

На сегодняшний день решение разнообразных задач диффузии и массопереноса в условиях орошения делается с проведением непрерывного мониторинга и прогнозирования водно-солевых режимов почв методами, связанными с разработкой моделей и программ [3–4]. Преобладание восходящих или нисходящих потоков влаги в зоне неполного водонасыщения диктует необходимость детального описания взаимосвязанных процессов влаго- и солепереноса [5–7].

Цель исследований

Обосновать возможные оптимальные модели вертикального солепереноса на примере орошаемых земель.

Изложение основного материала исследования

Объект исследований представлен подовым понижением земной поверхности в Солонянском районе Днепропетровской области. Количество выпавших осадков за год составило 476 мм.

Наиболее полно процесс солепереноса описывает следующее уравнение [8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (VC) + \beta(C_s - C) - \gamma(C_\gamma - C) = m \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

где D – коэффициент гидродисперсии, комплексный обобщенный параметр учитывающий все факторы рассеивания вещества, сопутствующие влагопереносу и фильтрации, $\text{м}^2/\text{сут}$;

C – минерализация подземных вод в зоне полного водонасыщения и почвенных растворов в зоне аэрации, $\text{г}/\text{дм}^3$;

V – скорость фильтрации в зоне полного водонасыщения и скорость вертикального влагопереноса в зоне аэрации, где вода движется преимущественно по вертикали, $\text{м}/\text{сут}$;

β – коэффициент растворения солей твердой фазы, сут^{-1} ;

C_s – концентрация предельного насыщения, $\text{г}/\text{дм}^3$;

γ – коэффициент поглощения солей из оросительной воды почвами и породами зоны аэрации, сут^{-1} ;

C_γ – концентрация предельного поглощения, $\text{г}/\text{дм}^3$;

m – активная пористость, доли единицы в зоне полного водонасыщения или объемная влажность в зоне аэрации;

x – пространственная координата, расстояние от начала координат до расчетной точки, м ;

t – временная координата, срок прогнозного расчета, сут

Слагаемое $\gamma(C_\gamma - C)$ равно нулю, если вода, используемая для орошения, соответствует научно-обоснованным критериям качества для данного региона. Ранее было математически доказано следующее: если начальное засоление для дальнейших прогнозных расчетов его изменения под влиянием орошения на различные сроки представлено в результатах химического анализа водных вытяжек, то исходное уравнение (1) упрощается существенно [9]. Водные вытяжки содержат все растворившиеся соли, которые до орошения присутствовали в твердой фазе. Поэтому слагаемое $\gamma(C_\gamma - C) = 0$. Скорость вертикального влагопереноса определяется балансовым методом, как средняя величина для зоны аэрации и слагаемое $\frac{\partial}{\partial x} (VC)$ заменяется на $V \frac{\partial C}{\partial x}$. Небольшая мощность зоны аэрации позволяет использовать в расчетах среднее значение параметра D . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} = m \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2)$$

где C – засоленность почв и пород зоны аэрации, определенная по результатам химического анализа водных вытяжек и выраженная в процентах от массы сухой почвы.

Это уравнение имеет несколько аналитических решений, частных для различных граничных условий. Основываясь на наших исследованиях можно утверждать, что наиболее достоверные результаты соответствуют аналитическому решению Данкверста–Бреннера [10]. Оно имеет следующий вид:

$$\bar{C} = 0.5 \left[\operatorname{erfc} z_2 + e^{-z_1^2 - z_2^2} (\operatorname{erfc} z_1 - 4a \operatorname{ierfc} z_1) \right], \quad (3)$$

где $\bar{C} = \frac{C - C_c}{C_0 - C_c}$; $z_1 = a(1 + \bar{x})$; $z_2 = a(1 - \bar{x})$; $\bar{x} = \frac{x}{x_0}$; $x_0 = \frac{Vt}{m}$; $a = \frac{\frac{V}{m} \sqrt{t}}{2\sqrt{\frac{D}{m}}}$.

В выражениях (3) приняты следующие обозначения \bar{C} – приведенная засоленность, безразмерная величина; C – прогнозное засоление, % массы сухого грунта;

C_c – текущее значение засоленности водопоступления, % массы сухой почвы;

\bar{x} – приведенная пространственная координата, безразмерная величина;

x_0 – мощность зоны максимального увлажнения, м;

C_0 – начальное засоление, % массы почвы;

$\operatorname{erfc} z_2, \operatorname{erfc} z_1, \operatorname{ierfc} z_1$ – табулированные интегральные функции.

Составляем схему солепереноса. Начало координат выбираем на поверхности земли. Граничное условие III-рода Данкверста–Бреннера задается для этого. Оно имеет следующий вид:

$$V = V_2 - V_1; V \cdot (C_c - C_0) = D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

Физический смысл граничного условия (4): количество солей, которое поступает на поверхность земли в процессе орошения рассеивается в зоне аэрации по законам молекулярной и конвективной диффузии.

Здесь V_1 – скорость восходящего потока влаги под влиянием атмосферных осадков и орошения, м/сут;

V_2 – скорость нисходящего потока влаги под влиянием атмосферных осадков и орошения, м/сут;

Определение миграционных параметров выполняем путем решения инверсной задачи. Скорость вертикального влагопереноса определяем балансовым методом. Для условий орошения формула для определения V имеет следующий вид:

$$V = \frac{A + O - (I + T)}{1000 \cdot t}, \quad (5)$$

где V – скорость вертикального влагопереноса за год или другой расчетный период t , м/сут;

A – количество атмосферных осадков за тот же период, мм;

O – оросительная норма, мм;

$(I + T)$ – суммарное испарение (испарение через поверхность почвы плюс транспирация), мм;

Для нахождения значения параметра гидродисперсии D нужно определить засоление в трех точках по вертикали и применить аналитическое решение Веригина [11]:

$$D = \frac{V \cdot \Delta x}{\ln(\bar{C} - 1)}; \bar{C} = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_3}; \quad (6)$$

где V – скорость вертикального влагопереноса, м/сут.

Δx – расстояние между расчетными точками, м;

C_1, C_2, C_3 – засоленность почв в расчетных точках 1,2,3, %;

Объемная влажность m при отсутствии экспериментальных данных принимают равной 0.18-0.22 [8].

Прогноз солевого режима почв в подовом понижении на территории предполагаемого орошения с засоленностью 0.9% был выполнен с учетом исходной информации при следующих данных: $A = 476$ мм/год; $(I + T) = 565$ мм/год; $O = 200$ мм; $t = 5$ лет.

Проведенные расчеты согласно формулам 4 и 5 позволили определить значения параметров солепереноса: $V = 0.0003$ м/сут; $C_c = 0.001$ %.

По формуле (3) определяем величины $x_0; \bar{x}; a; z_1; z_2$. Затем находим прогнозную засоленность на поверхности земли (при условии $x = 0$) и в остальных расчетных точках.

Последовательность выполнения расчета представлены в табл. 1.

Согласно выполненным расчетам засоление почвы на поверхности исследуемой территории составит 0.322%. Полное рассоление соответствует 0,25% [8]. После увеличения оросительной нормы процесс расчета был выполнен снова.

Таблица 1

Расчетные значения параметров солепереноса

№ расчетной точки	X, m	z_1	z_2	z_1^2	z_2^2	$[e^{z_1^2 - z_2^2}]$	$erfcz_2$	$erfcz_1$	$ierfcz_1$	\bar{C}	C, %
0	0	0.45	0.45	0.20	0.20	1.000	0.524	0.524	0.225	0.32	0.322
1	0.25	0.49	0.41	0.24	0.17	1.070	0.562	0.488	0.205	0.35	0.349
2	0.5	0.53	0.37	0.28	0.14	1.156	0.601	0.453	0.545	0.37	0.370

Результаты расчета показывают, что рассоление верхнего метрового слоя (до содержания солей менее 0,25%) в течение 5 лет произойдет при увеличении оросительной нормы до 3000 м³/га.

Выводы

В основе математических моделей солепереноса на орошаемых землях положена теория физико-химической гидродинамики пористых сред, согласно которой этот процесс описывается уравнениями движения и сохранения вещества. Использование в прогнозных расчетах минерализации водных вытяжек вместо почвенных растворов позволяет упростить структуру уравнений и подготовку расчетных параметров. Решение серии прямых задач массопереноса дает возможность выбрать оптимальную оросительную норму, позволяющую рассолить верхний метровый слой аэрации за нужный период времени. Решение эпигнозных задач позволяет повысить достоверность определения миграционных параметров.

Список использованной литературы

1. Онойко Ю. Ю. Галогенні ґрунти подів межиріччя Дніпро–Молочна. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2013. Вип. 46. С. 284–291.
2. Евдокимова Т. И., Быковская Т. К. Почвы подовых понижений юга Украины. Москва: МГУ, 1985. 96 с.
3. Бородычев В. В., Дедова Э. Б., Сазанов М. А., Лытов М. Н. Моделирование процесса управления водно-солевым режимом почв в условиях орошения. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2016. № 2 (42). С. 26–33.
4. Фалькович А. С., Пронько Н. А. Прогноз водно-солевого режима почвогрунтов при разработке проекта реконструкции оросительной системы и определение параметров миграции влаги и солей. *Вопросы мелиорации и водного хозяйства Саратовской области*. Саратов: СГАУ, 2002. С. 23–33.
5. Nachshon U. Cropland Soil Salinization and Associated Hydrology: Trends, Processes and Examples. *Water*. 2018. № 10. 21 p. DOI:10.3390/w10081030
6. Bouksila F. et al. Assessment of Soil Salinization Risks under Irrigation with Brackish Water in Semiarid Tunisia. *Environmental and Experimental Botany*. 2013. Vol. 92. P. 176–185. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.06.002
7. Seydehmet Jumeniyaz, Hui Lv Guang, Nurmemet Ilyas, Aishan Tayierjiang, Abliz Abdulla, Sawut Mamat, Abliz Abdugheni, Eziz Mamattursun. Model Prediction of Secondary Soil Salinization in the Keriya Oasis, Northwest China. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Issue 3. 22 p. DOI:10.3390/su10030656.
8. Аверьянов С. Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. Москва: Колос, 1978. 288 с.
9. Евграфкина Г. П. Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий: монография. Днепропетровск: Монолит, 2003. 200 с.
10. Brenner H. The Diffusion Model of Longitudinal Mixing in Beds of Finite Length. Numerical values. *Chemical engineering Science*. 1962. Vol. 17. № 1. P. 229–243.
11. Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян В. С., Шержуков Б. С. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод. Москва: Колос, 1979. 336 с.

References

1. Onoiyko, Y. Y. (2013). Halohennny grunty podyv mezhyrychchya Dnipro–Molochna. *Vysnyk Lvyyvskogo universitetu. Seriya geograpychna*. **46**, 284–291.
2. Yevdokimova, T. I., & Bykovskaya, T. K. (1985). Pochvy podovyh ponyzheni yuga Ukrayiny. Moskva. MGU.

3. Borodychev, V. V., Dedova, E. B., Sazanov, M. A., & Lytov, M. N. (2016). Modelyrovaniie processa upravleniia vodno-solevym rezymom pochv v usloviiah orosheniia. *Izvestiya Nyznevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka y vyssheie professionalnoye obrazovaniie*. **2**, 26–33.
4. Falkovych, A. S., & Pron'ko, N. A. (2002). Prognoz vodno-solevogo rezhyma pochvogrunтов pry razrobotke proekta rekonstruktsii orositelnoy systemy i opredeleniie parametrov migratsii vlagi i solei. *Voprosy melioratsii i vodnogo hozyaystva Saratovskoiy oblasti*. Saratov: SGAU, pp. 23–33.
5. Nachshon, U. (2018). Cropland Soil Salinization and Associated Hydrology: Trends, Processes and Examples. *Water*. **10**, 21 p. DOI:10.3390/w10081030.
6. Bouksila F. et al. (2013). Assessment of Soil Salinization Risks under Irrigation with Brackish Water in Semiarid Tunisia. *Environmental and Experimental Botany*. **92**, 176–185. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.06.002
7. Seydehmet, J., Hui Lv, G., Nurmemet, I., Aishan, T., Abliz, A., Sawut, M., Abliz, A. & Eziz, M. (2018). Model Prediction of Secondary Soil Salinization in the Keriya Oasis, Northwest China. *Sustainability*. **10**, 3, 22 p. DOI:10.3390/su10030656.
8. Aver'yanov, S. F. (1978). *Bor'ba s zasoleniyem oroshaemyh zemel*. Moskva: Kolos.
9. Yevgrashkina, G. P. (2003). *Vliyanie gornodobyvayucshey promyshlennosty na hydroheologicheskiie I pochvenno-meliorativniie usloviia teritoriy: monographiia*. Dnepropetrovsk: Monolit.
10. Brenner, H. (1962). The Diffusion Model of Longitudinal Mixing in Beds of Finite Length. Numerical values. *Chemical engineering Science*. **17**, 1, 229–243
11. Verygyn, N. N., Vasylyev S. V., Sarkysyan V. S., & Sherzhukov B. S. (1979). *Metody prognoza solevogo rezhyma gruntov y gruntovyh vod*. Moskva: Kolos.

Евграшкіна Галіна Петровна – д.геол.н., професор, професор кафедри наук о Земле Дніпровського національного університету ім. О. Гончара, e-mail: ecohous@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0839-7068.

Харитонов Николай Николаевич – д.с.-х.н. професор, професор кафедри общего земледелия и почвоведения Дніпровського державного аграрно-економічного університету, e-mail: kharytonov.m.m@dsau.dp.ua, ORCID: 0000-0002-4650-5819.