

УДК 532.543:626.80

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛЕПЕРЕНОСА В ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

**Авлакулов Мейли** – доктор технических наук, профессор,  
ORCID: 0000-0002-8154-1153, E-mail: [mavlakulov@mail.ru](mailto:mavlakulov@mail.ru).

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан

***Аннотация.** Одной из основных задач исследований солепереноса считается выбор соответствующей данным условиям математической модели на основе изучения структурных особенностей отдельных горизонтов изучаемой толщи пород, закономерностей передвижения веществ, способов описания действия этих процессов.*

*В данной статье рассматривались некоторые вопросы моделирования переноса солей в условиях бороздкового полива хлопчатника, когда можно пренебречь сезонными отклонениями от общего направления процесса. Разработан метод определения параметров солепереноса в условиях стационарного солевого режима почвогрунтов зоны аэрации по среднему засолению почв заданной мощности, при бороздковом поливе хлопчатника, по данным лизиметрических экспериментов. Известно, что стационарный ионно-солевой и водный режимы формируются при длительном орошении или в естественных условиях и наступают при равновесии факторов, способствующих выносу солей из пород зоны аэрации и грунтовых вод и поступлению солей.*

*Предлагаемый метод определения параметров солепереноса в условиях стационарного водно-солевого режима почвогрунтов, по данным как полевых, так и лабораторных экспериментов, учитывает изложенные выше особенности.*

*При стационарном распределении солей и постоянной скорости движения влаги в зоне аэрации почвы решение прямой задачи позволяют прогнозировать среднюю минерализацию поровых растворов в породах зоны аэрации при бороздковом поливе хлопчатника.*

***Ключевые слова:** водно-солевой баланс, уровень грунтовых вод, солеперенос, зона аэрации, пористая среда, математическое моделирование, транспирация, испарение.*

UDC 532.543:626.80

## DETERMINATION OF SALT TRANSFER PARAMETERS IN LYSIMETRIC STUDIES

**Avlakulov, Meyli** – Doctor of Technical Sciences, professor,  
ORCID: 0000-0002-8154-1153, E-mail: [mavlakulov@mail.ru](mailto:mavlakulov@mail.ru).

Karshi engineering-economics institute, Karshi city, Uzbekistan

***Abstract.** One of the main tasks of salt transfer research is the selection of a mathematical model that corresponds to given conditions based on the study of the structural features of individual horizons of the studied rock strata, the patterns of movement of substances, and methods for describing the action of these processes.*

*This article examined some issues of modeling salt transfer under conditions of furrow irrigation of cotton, when seasonal deviations from the general direction of the process can be neglected. A method has been developed for determining the parameters of salt transfer under conditions of a stationary salt regime of soils in the aeration zone based on the average salinity of soils of a given thickness, during furrow irrigation of cotton, according to the data of lysimetric experiments. It is known that stationary ion-salt and water regimes are formed during long-term irrigation or under natural conditions and occur when the factors that contribute to the removal of salts from the rocks of the aeration zone and groundwater and the influx of salts are in equilibrium.*

*The proposed method for determining the parameters of salt transfer under conditions of a stationary water-salt regime of soils, according to data from both field and laboratory experiments, takes into account the above-mentioned features.*

*With a stationary distribution of salts and a constant speed of moisture movement in the soil aeration zone, the solution of the direct problem makes it possible to predict the average mineralization of pore solutions in the rocks of the aeration zone during furrow irrigation of cotton.*

**Key words:** *water-salt balance, groundwater level, salt transfer, aeration zone, porous medium, mathematical modeling, transpiration, evaporation.*

UO‘K 532.543:626.80

## LISIMETRIK TADQIQOTLARDA TUZ KO‘CHISH PARAMETRELARINI ANIQLASH

**Avlakulov Meili** – texnika fanlari doktori, professor,  
ORCID: 0000-0002-8154-1153, E-mail: [mavlakulov@mail.ru](mailto:mavlakulov@mail.ru).

Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

**Annotatsiya.** *Tuz almashinuvini tadqiq etishning asosiy vazifalaridan biri o‘rganilayotgan tuproq qatlamlarining alohida gorizontlarining strukturaviy xususiyatlarini, moddalarning harakatlanish qonuniyatlarini va ularni tavsiflash usullarini o‘rganish asosida berilgan shartlarga mos keladigan jarayonlar harakatining matematik modelini tanlashdan iborat. Ushbu maqolada g‘o‘zani egatlab sug‘orish sharoitida, jarayonning umumiy yo‘nalishidan mavsumiy og‘ishlarga e‘tibor bermaslik mumkin bo‘lgan sharoitda tuz o‘tkazishni modellashtirishning ba‘zi masalalari ko‘rib chiqilgan.*

*Lizimetrik tajribalar ma‘lumotlariga ko‘ra, g‘o‘zani egatlab sug‘orishda ma‘lum qalinlikdagi tuproqlarning o‘rtacha sho‘rlanishidan kelib chiqib, aeratsiya zonasidagi tuproqlarning statsionar tuz rejimi sharoitida tuz o‘tkazish parametrlarini aniqlash usuli ishlab chiqilgan. Ma‘lumki, statsionar ion-tuz va suv rejimlari uzoq muddatli sug‘orish paytida yoki tabiiy sharoitda hosil bo‘ladi va aeratsiya zonasi jinslari va yer osti suvlaridan tuzlarni olib ketish va tuzlarning kirib kelishiga yordam beradigan muvozanat omillari mavjud bo‘lganda yuzaga keladi.*

*Tuproqlarning statsionar suv-tuz rejimi sharoitida tuz o‘tkazish parametrlarini aniqlashning taklif etilayotgan usuli, ham dala, ham laboratoriya tajribalari ma‘lumotlariga ko‘ra, yuqorida qayd etilgan xususiyatlarni hisobga oladi.*

*Tuproqning aeratsiya zonasida tuzlarning statsionar taqsimlanishi va namlik harakatining doimiy tezligi bilan to‘g‘ri masalani hal qilish g‘o‘zani egatlab sug‘orishda aeratsiya zonasi jinslarida g‘ovak eritmalarining o‘rtacha minerallashuvini taxmin qilish imkonini beradi.*

**Kalit so‘zlar:** *suv-tuz muvozanati, yer osti suvlari sathi, tuz o‘tkazish, aeratsiya zonasi, g‘ovak muhit, matematik modellashtirish, transpiratsiya, bug‘lanish,*

## Введение

Достоверность решения задач по прогнозированию солевого режима почвогрунтов в значительной степени зависит от точности определения параметров солепереноса. Важное значение имеет выбор математической модели солепереноса, удовлетворительно описывающее изучаемые явления [2, 3]. Качественные и количественные изменения содержания солей в условиях стационарного водно-солевого режима прогнозируются с помощью аналитических методов. Аналитические методы основаны на использовании решений уравнения водно-солевого баланса, записанного в дифференциальной форме для конкретных расчетных схем. Практический интерес представляет прогнозирование

рассоления и вторичного засоления зоны аэрации почвогрунтов в результате длительного орошения и подъема уровня грунтовых вод [5, 6]. При прогнозировании необходимо заранее знать параметры модели солепереноса при бороздковом поливе хлопчатника. Анализ теории солепереноса в случае фильтрации воды в почве показывает, что основными оставляющими, осуществляющими перенос водно-растворимых солей являются параметры конвективной диффузии, которые определяются в лабораторных или полевых условиях. Их нахождение производится решением обратной задачи математической физики, в результате которого решая краевой задачи можно будет найти параметры дифференциальных уравнений.

### Материалы и методы

Разработан метод определения параметров солепереноса в условиях стационарного солевого режима почвогрунтов зоны аэрации по среднему засолению почв заданной мощности, при бороздковом поливе хлопчатника, по данным лизиметрических экспериментов. На основе решения модели солепереноса, описывающей процесс в условиях стационарного водно-солевого режима почвогрунтов зоны аэрации, возможно определение параметра конвективной диффузии по среднему засолению почвы как при отсутствии, так и при наличии транспирации. Основным преимуществом метода является облегчение вычислительной процедуры и достоверность значений параметра конвективной диффузии, так как не используется в расчетах трудно определяемая в мелиоративной практике исходная информация о солесодержании на поверхности почвы [8, 9].

Более надежными являются интегральные методы, когда при нахождении параметров используются экспериментальные данные о процессе за определенный промежуток времени в некоторых точках пористой среды или информация во всей рассматриваемой области пространства на определенном отрезке времени. Однако на практике получить информацию о процессе в таком объеме не всегда возможно из-за сложности, трудоемкости и высокой стоимости соответствующего эксперимента.

В результате исследований по данной тематике выяснилось, что существующие методика определения параметров [6, 9], особенно для условий нестационарного режима, разработаны недостаточно. По результатам исследований было доказано, что необходимо разработать методику по определению параметров модели солепереноса по значениям средней засоленности промываемой толщи почвогрунтов до и после полива хлопчатника, которые являются более достоверными. Обоснование этих методов заключается в том, что средние значения распределения солей в толще, представлявшие собой интегральные величины, определяются более точно и являются более информативными, чем содержание солей в какой-либо толще почвы.

Предлагаемый метод определения параметров солепереноса в условиях стационарного водно-солевого режима почвогрунтов, по данным как полевых, так и лабораторных экспериментов, учитывает изложенные выше особенности [10, 11, 12].

В данной статье изучены некоторые вопросы стационарного распределения легкорастворимых солей в почве и грунтах зоны аэрации на основе математического моделирования. Для реализации цели были поставлены конкретные задачи:

- изучение миграции солей под действием инфильтрации и испарения с поверхности грунтовых вод при отсутствии и наличии транспирации;
- разработка методов расчета гидрохимического параметра дисперсии на основе лизиметрических наблюдений за процессом распределения легкорастворимых солей под действием инфильтрации и испарения при бороздковом поливе хлопчатника;
- апробация полученных решений при сравнении прогнозных данных с лизиметрическими наблюдениями.

## Обсуждения

Одной из основных задач исследований солепереноса следует считать выбор соответствующей по данным условиям математической модели на основе изучения: а) структурных особенностей отдельных горизонтов изучаемой толщи пород (почв, грунтов, зоны аэрации грунтовых вод), б) закономерностей передвижения веществ, в) рассмотренных процессов, г) способов описания действия этих процессов. Успех прогнозирования процессов солепереноса в почвах с помощью математического моделирования в каждом конкретном случае зависит от разумного выбора модели. Этот выбор определяется свойствами почв, характером водных режимов и точностью входной информации [4, 7].

Стационарный процесс перераспределения легкорастворимых и подвижных солей в почвах при малом содержании их в твердой фазе и постоянной скорости движения влаги в зоне аэрации во времени описывается распространенным уравнением [7, 13]:

$$D_a \frac{d^2 C}{dx^2} - \frac{d(v_a C)}{dx} = 0 \quad (0 \leq x \leq L), \quad (1)$$

где  $C$  - концентрация солей почвенного раствора на глубине  $x$ , г/л или %;  $D_a = \lambda |v_a| = \lambda |v_n - w_p|$  - коэффициент конвективной диффузии, м<sup>2</sup>/сут;  $\lambda$  - коэффициент, учитывающий дисперсию скорости потока в порах разного размера, называемый шагом смещения;  $m$ ;  $v_a = v_n - w_p \equiv const$  - средняя скорость движения воды в порах, м/сут;  $v_n$  - среднегодовая интенсивность суммарного поступления воды на поверхность почвы (поливы, осадки, конденсационные воды), м/сут;  $w_p$  - среднегодовая интенсивность суммарного расходования подземной воды на испарение и транспирацию, м/сут;  $L$  - глубина грунтовых вод от поверхности земли, м.

Для случаев, когда скорость движения влаги зависит от глубины, уравнение имеет вид:

$$D_a \frac{d^2 C}{dx^2} - v_a \frac{dC}{dx} = 0. \quad (2)$$

Подробный анализ уравнений (1), (2) и их решений приводится в работах [1,5,7,8].

Если  $v_n < w_p$ , т.е. скорость  $v_a$  направлена вверх, то наблюдается засоление почвы. Если благодаря поливам  $v_n > w_p$  и  $v_a > 0$ , то вследствие диффузии происходит рассоление почв.

На поверхности почв [1] было предложено условие

$$D \frac{\partial C(0)}{\partial x} - (v_n - w_p)C(0) = -v_n C_n, \quad (3)$$

где  $C_n$  - концентрация поливных вод, г/л или %;  $C(0)$  - концентрация солей на поверхности почвы ( $x = 0$ ), г/л или %.

На нижней границе  $x = L$  может быть задано условие первого рода:

$$C(L) = C_{гр}, \quad (4)$$

где  $C_{гр}$  - концентрация солей у поверхности грунтовых вод, г/л или %.

## Результаты

**Решение прямой задачи.** При стационарном распределении солей и постоянной скорости движения влаги в зоне аэрации почвы ( $0 \leq x \leq L$ ) следует решать уравнение (2) при условии (3) и (4). Решение его получено [1] и имеет вид:

$$C(x) = \left( C_{гр} + \frac{v_n C_n}{w_p - v_n} \right) \exp \left[ \left( \frac{w_p - v_n}{D} \right) (L - x) \right] - \frac{v_n C_n}{w_p - v_n}. \quad (5)$$

Зависимость (3.5) справедлива в том случае, если поливные воды, осадки и грунтовые воды, поступающие в породы и зону аэрации, расходуются лишь на испарение. Однако, в

вегетационный период в пределах орошаемых массивов часть воды, поступающая в зону аэрации, расходуется на транспирацию ее растениями.

Например, если скорость транспирации линейно зависит от глубины, т.е.  $w_p = \frac{x}{x_1} w$ , тогда скорость перемещения почвенного раствора в поровом пространстве будет иметь вид:  $v_a = v_n - w_p = v_n - \frac{x}{x_1} w$ , где  $x_1$  – мощность зоны транспирации. В этом случае решение уравнения (1), полученное С.Ф. Аверьяновым, при условиях (3) и (4) имеет вид:

$$C(x) = C_{гр} e^{(1-\bar{x})(1+\bar{x}-2\bar{v})Pe_1} + 2\bar{v}C_n \sqrt{Pe_1} [f(y_1) - f(y_2)] e^{-Pe_1(\bar{x}-\bar{v})^2}, \quad (6)$$

где  $f(y) = \int_0^y \exp(t^2) dt$  - интеграл вероятности от мнимого аргумента.

$$\bar{x} = \frac{x}{x_1}, \quad \bar{v} = \frac{v_n}{w}, \quad Pe_1 = \frac{wx_1}{2D}, \quad y_1 = (1 - \bar{v})\sqrt{Pe_1}, \quad y_2 = (\bar{x} - \bar{v})\sqrt{Pe_1}. \quad (7)$$

Более подробное исследование уравнения (1) при различных законах изменения  $w_p$  от глубины приводится в работах [7].

Пользуясь формулой (5), можно определить среднее содержание солей  $S(l)$  (6) в почвенном слое  $[0, L]$ :

$$S(l) = \frac{1}{l} \int_0^l C(x) dx = \left( C_{гр} + \frac{v_n C_n}{w_p - v_n} \right) \frac{D_a}{L(w_p - v_n)} \left[ e^{\left( \frac{w_p - v_n}{D_a} \right)} - 1 \right] - \frac{v_n C_n}{w_p - v_n} \quad (8)$$

Учитывая представления  $D_a = \lambda |v_n - w_p|$  и вводя замену переменных

$$\bar{S}(L) = \frac{S(L)}{C_{гр}}, \quad \bar{C}_n = \frac{C_n}{C_{гр}}, \quad \bar{V} = \frac{w_p}{v_n}, \quad \eta = \frac{L}{\lambda}, \quad \omega = \frac{\bar{C}_n}{\bar{V} - 1}, \quad (9)$$

перепишем (6) в следующем безразмерном виде:

$$\frac{\bar{S}(l) + \omega}{1 + \omega} = \begin{cases} f_1(\eta) = \frac{1}{\eta} [\exp(\eta) - 1] \text{ при } \bar{V} = \frac{w_p}{v_n} > 1 \\ f_2(\eta) = \frac{1}{\eta} [1 - \exp(\eta)] \text{ при } \bar{V} = \frac{w_p}{v_n} < 1 \end{cases} \quad (10)$$

Формулы (8) или (10) позволяют прогнозировать среднюю минерализацию поровых растворов в породах зоны аэрации (от поверхности почвы до уровня грунтовых вод) при бороздовом поливе хлопчатника.

Средняя минерализация порового раствора в пределах корнеобитаемого слоя хлопчатника в условиях линейной транспирации может быть определена путем интегрирования решения (3.6) (для  $C_n = 0$ ) при  $x$ , меняющемся от 0 до  $L$  [1, 7]:

$$\bar{S}(L) = C_p \sqrt{\frac{\pi D}{2Lw}} \exp \left[ \frac{wL}{2D} \left( \frac{v_n}{w} - 1 \right)^2 \right] \left\{ \operatorname{erfe} \left[ \left( \frac{v_n}{w} - 1 \right) \sqrt{\frac{wL}{2D}} \right] - \operatorname{erfe} \left( \frac{v_n}{w} \sqrt{\frac{wL}{2D}} \right) \right\}. \quad (11)$$

С учетом подстановок  $Pe = wL/2D$  перепишем (11) в виде:

$$\bar{S}(L) = \sqrt{\frac{\pi D}{4Pe}} \exp [Pe(\bar{V} - 1)^2] \{ \operatorname{erfe} [(\bar{V} - 1)\sqrt{Pe}] - \operatorname{erfe}(\bar{V}\sqrt{Pe}) \}, \quad \bar{V} = \frac{v_n}{w}. \quad (12)$$

## Выводы

При стационарном распределении солей и постоянной скорости движения влаги в зоне аэрации почвы ( $0 \leq x \leq L$ ) решение прямой задачи позволяет прогнозировать среднюю минерализацию поровых растворов в породах зоны аэрации (от поверхности почвы до уровня грунтовых вод) при бороздовом поливе хлопчатника. Решением прямой задачи можно вывести уравнения, решение которых позволяют судить о некоторых составляющих гидрохимического процесса солепереноса. При этом в состав этих уравнений не входит трудно определяемая исходная информация о содержании солей на поверхности почвы  $C(0)$ , что облегчает вычислительную процедуру, а кроме того, позволяет более достоверно судить о значении гидрохимического параметра  $\lambda$ . Следует отметить, что поскольку параметр  $\lambda$  не может быть отрицательной величиной, то при постановке опытов должны соблюдаться следующие условия:  $f_1(\eta) > 1$  при  $\bar{w}_p > 1$ ,  $f_2(\eta) < 1$  при  $\bar{w}_p < 1$ .

## Литература

- [1] Van der Ploeg R. R., Kirkham M. B., Marquardt M. The Golding equation for soil drainage: its origin, evolution and use // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 2009. – 63. – P. 33–39.
- [2] Van Genuchten M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 2015. – 44. – P. 892–898.
- [3] Zhang Z. F., Ward A. L., Gee G. W. Describing the unsaturated hydraulic properties of anisotropic soils using a tensorial connectivity tortuosity (TCT) concept // *Vadose Zone J.* – 2013. – No 2(3). – P. 313–321.
- [4] Шейн Е. В., Архангельская Т. А., Гончаров В. М. и др. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. Е. В. Шейна. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 200 с.
- [5] Mann C. User's guide for the Johnson and Ettinger (1991) model for subsurface vapor intrusion into buildings. – Durham: Experimental Quality Management. – 2017. – 62 p.
- [6] Mualem Y. Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics // *Water Resour. Res.* – 2017. – 13. – P. 773–780.
- [7] Scanlon B. R., Milly P. C. D. Water and heat fluxes in desert soils. Numerical simulations // *Water Resour. Res.* – 2014. – 30. – P. 721–733.
- [8] Ивицкий А. И. Основы проектирования и расчета систем дренажа и увлажнения, Минск: Наука и техника, 2018 (in Russian).
- [9] Murashko A. I. Agricultural drainage in the humid zone, Moscow: Kolos, 2012 (in Russian).
- [10] Avlakulov M., Kodirov I. E., Faiziev S. S. Mass transfer processes in a heterogeneous medium occurring in the aeration zone during infiltration of surface waters // *E3S Web of Conferences.* – EDP Sciences, 2023. – Т. 411. – С. 02022.
- [11] Makhmudov I. E. et al. Improvement of hydraulic methods for control of soil humidization during furrow irrigation of agricultural crops. – 2022.
- [12] Avlakulov M., Matyakubov B., Kodirov I. Methods for solving the problem of filter flow with furrow irrigation // *AIP Conference Proceedings.* – AIP Publishing, 2023. – Т. 2612. – №. 1
- [13] Avlakulov, M., Kodirov, I.E., Faiziev, S.S. Mass transfer processes in a heterogeneous medium occurring in the aeration zone during infiltration of surface waters. *E3S Web of Conferences* 2023, 411, 02022
- [14] Avlakulov M., Matyakubov B., Kodirov I. Methods for Solving the Problem of Filter Flow with Furrow Irrigation. *E3S Web of Conferences* 2023, 2612, 050032