

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ «СОЛЕВОЙ КАЙМЫ» ПРИ КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ

Н. Н. Дубенок¹, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, **А. Е. Новиков**^{2,3}, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, **В. В. Алексеев**⁴, доктор технических наук, **С. А. Васильев**⁴, доктор технических наук, **В. П. Филиппов**⁴, кандидат физико-математических наук, **П. А. Михеев**¹, доктор технических наук

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49

²Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия,
400002, Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9

³Волгоградский государственный технический университет,
400005, Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28

⁴Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова,
428015, Чебоксары, Московский просп. 15

E-mail: vsa_21@mail.ru

Процесс фертигации, заключающийся в обеспечении растений минеральными веществами, содержащимися в поливной воде, широко распространен, несмотря на имеющийся ряд негативных эффектов. Подавляющее большинство исследований направлено на изучение пространственного распределения солей при поливах. В межполивные периоды и по окончании поливного сезона процессы миграции и концентрации солей в почве при снижении влажности (высыхании) практически не рассматриваются. Цель исследований – моделирование режимов высыхания светло- и темно серых лесных почв Чувашской Республики после фертигации. Работу выполняли с 2020 по 2023 гг. Поскольку состояние почвы до начала капельного орошения существенно влияет на процесс высыхания, в работе рассмотрены ситуации, позволяющие повлиять на него в плане снижения негативных эффектов. Моделирование перемещения почвенной влаги в процессе и после окончания капельного полива позволяет выявлять различные случаи образования солевой «каймы». Выявление возможных режимов позволяет, учитывая особенности начального распределения влаги, проводить предварительную подготовку почвы к фертигации. При высыхании соли в основном могут концентрироваться в областях с резким градиентом влажности, то есть на границах между сухой и увлажняющей почвой. Это связано с тем, что почвенная влага, из-за возникающего перепада давлений, попадает в область с уже повышенной концентрацией солей. Разработанная модель позволяет анализировать эффект образования солевой каймы по заданным начальным и граничным условиям в виде градиентов влажности, пористости, удельной поверхности почвы, интенсивности и продолжительности полива, концентрации солей.

SIMULATION OF THE MODES OF APPEARANCE OF «SALT FRAME» DURING DRIP IRRIGATION

N. N. Dubenok¹, **A. E. Novikov**^{2,3}, **V. V. Alekseev**⁴, **S. A. Vasiliev**⁴,
V. P. Filippov⁴, **P. A. Mikheev**¹

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
127550, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49

²All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture,
400002, Volgograd, ul. Timiryazeva, 9

³Volgograd State Technical University,
400005, Volgograd, prosp. Lenina, 28

⁴Ulyanov Chuvash State University,
428015, Cheboksary, Moskovskii prosp., 15

E-mail: vsa_21@mail.ru

The process of fertigation, which consists in providing plants with minerals contained in irrigation water, is widespread, despite a number of negative effects. The overwhelming majority of studies are aimed at studying the spatial distribution of salts during irrigation, in the interirrigation periods and at the end of the irrigation season, the processes of migration and salt concentration in the soil with a decrease in moisture (drying) are practically not considered. The purpose of this work is to simulate the modes of drying of light and dark gray forest soils of the Chuvash Republic (Russia) after fertigation. The studies were carried out in the period from 2020 to 2023. Since the state of the soil before the start of drip irrigation significantly affects the drying process, the paper considers situations that allow it to be influenced in terms of reducing negative effects. Modeling the movement of soil moisture both during and after the end of drip irrigation makes it possible to identify both cases in which the formation of a salt «border» does not occur or the effect is least pronounced, and those in which the formation of areas with a high salt concentration takes place with high intensity. The identification of such regimes allows, taking into account the characteristics of the initial distribution of moisture, to carry out preliminary preparation of the soil for fertigation. The paper shows that during drying, salts can mainly concentrate in areas with a sharp moisture gradient, that is, at the boundaries between dry and moist soil. This is due to the fact that soil moisture, due to the resulting pressure drop, enters an area with an already increased salt concentration. The developed model makes it possible to analyze the effect of salt fringe formation according to given initial and boundary conditions in the form of moisture gradients, porosity, specific soil surface, irrigation intensity and duration, and salt concentration.

Ключевые слова: капельное орошение, фертигация, «солевая кайма», удельная поверхность почвы, объемная пористость почвы, основная гидрофизическая характеристика, функция влагопроводности, солеперенос

Key words: drip irrigation, fertigation, «salt fringe», specific surface area of the soil, bulk porosity of the soil, water retention curve, moisture conductivity, salt transfer

Одним из неоспоримых преимуществ капельного орошения выступает возможность обеспечения растений минеральными веществами с использованием поливной воды. Экономия, связанная с локализацией необходимых минеральных элементов в области корневой системы растения, делает этот процесс достаточно эффективным. В современной научной литературе имеется ряд разработок, позволяющих учесть пространственную неоднородность свойств почвы и организовать полив таким образом, чтобы свести к минимуму избыток или, наоборот, недостаток элементов питания в соответствии с биологическими особенностями растения [1, 2, 3]. В последние годы, практически все исследования направлены на изучение пространственного распределения солей при орошении [4, 5, 6]. Однако в реальных условиях нельзя ограничиваться изучением только процесса орошения [7], так как перераспределение влаги и солей продолжается и после окончания полива [8], а наиболее опасные для дальнейшего природопользования эффекты могут проявиться именно при высыхании почвы [9, 10].

Процесс высыхания почвы после удобрительного орошения практически не исследован в современной научной литературе. Наши наблюдения позволили обнаружить некоторые его особенности. По результатам экспериментов установлено, что соли преимущественно концентрируются на границе контура увлажнения – между сухой и увлажненной почвой. В их миграции основным влияющим фактором выступает пространственное распределение влаги в почве до начала полива. Орошение без учета этой особенности приводит к появлению так называемой «солевой каймы», которую можно увидеть даже невооруженным глазом при раскапывании почвы на экспериментальных участках.

Анализ научных работ свидетельствует о необходимости разработки адекватных численных методов моделирования миграции солей при высыхании почвы с образованием «солевой каймы» для прогнозирования мероприятий по рассолению и уменьшению неблагоприятных эффектов.

Цель исследований – моделирование режимов высыхания почвы после фертигации при различных начальных и граничных условиях для выявления случаев, при которых образование «солевой каймы» не происходит или эффект наименее выражен.

Методика. Известно, что в зависимости от степени увлажнения почвы, вода в ней проходит через ряд состояний, характеризующихся различными реологическими моделями. Для объяснения концентрации солей на границе контура увлажнения используем понятие прочно связанной воды. Она бывает химически связанной (входит в молекулы минералов в виде ионов), адсорбированной (молекулы ориентируются на поверхности почвенных частиц) и гигроскопической (поглощается из воздуха), и отличается от свободной воды диэлектрической проницаемостью, вязкостью, а также другими физическими свойствами, но главное, прочно связанная вода перестает растворять соли.

То есть, определив величины, соответствующие влажности, при которой вода переходит в прочно связанное состояние, можно проводить численное моделирование процесса образования «солевой каймы».

Минеральные вещества перемещаются в растворенном виде с поливной водой в соответствии с законами гидрофизики. Кривая водоудержания почвы (1) и функция влагопроводности показывают, как влага с растворенными питательными веществами будет перемещаться по почве под действием градиента давления [11]. В нашем случае при рассмотрении энергии

почвенной влаги будем учитывать ψ' – потенциал, обусловленный взаимодействием влаги с твердой фазой почвы, ψ'' – потенциал, обусловленный взаимодействием влаги с почвенным воздухом, ψ''' – потенциал, связанный с наличием осмотического давления из-за растворенных в воде минеральных элементов. Тогда зависимость потенциала влажности почвы ψ от объемной влажности w можно записать в следующем виде [12]:

$$\psi = \psi' + \psi'' + \psi''' = \frac{A\Omega_0^2}{\rho w^2} + \frac{\Omega_0 \sigma_{lg}}{\rho} D(w, P_0) + \frac{RT}{\rho} \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; σ_{lg} – коэффициент поверхностного натяжения (вода – воздух), Дж/м²; Ω_0 – объемная удельная поверхность, м²/м³; w – объемная влажность, м³/м³; A – постоянная, Дж; P_0 – пористость сухого образца, м³/м³; $D(w, P_0)$ – безразмерная функция, учитывающая гранулометрический состав почвы; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)); T – температура, К.

При низкой влажности почвенная влага представлена в виде тонких пленок (4...5 мономолекулярных слоев толщиной $\sim 10^{-9}$ м), а ее молекулы достаточно тесно и упорядоченно расположены на поверхности почвенных частиц. В силу своей строгой пространственной ориентации она не может растворять соли. При увеличении толщины пленки воды до влажности $h + \Delta h \sim 10^{-8}$ м появляется переходный слой Δh , растворимость которого увеличивается до нормального значения. Определить влажность w_0 , соответствующую слою h , можно различными способами. Один из них заключается в пропускании электрического тока через образец грунта до тех пор, пока сила тока не станет равной нулю, поскольку чистая вода выступает диэлектриком ($\epsilon = 81$).

Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) – специфичная для каждого типа почвы (характеризует структуру порового пространства почвы, гранулометрический и минералогический состав) зависимость между давлением почвенной влаги и влажностью. Используя ОГХ также можно определить w_0 . Для этого необходимо составить и решить систему уравнений, одно из которых определяет кривую водоудержания почвы $p(w)$, а второе $p = 5,2 + 3w$ – характеризует максимальную адсорбционную способность [12]. Получаемые при этом решения для различных типов почв, например, Чувашской Республики [13, 14] заметно различаются (рис. 1). Кривая водоудержания ОГХ рассчитана и представлена в стандартной графической форме как зависимость давления от влажности (для давления p используется логарифмическая шкала pF).

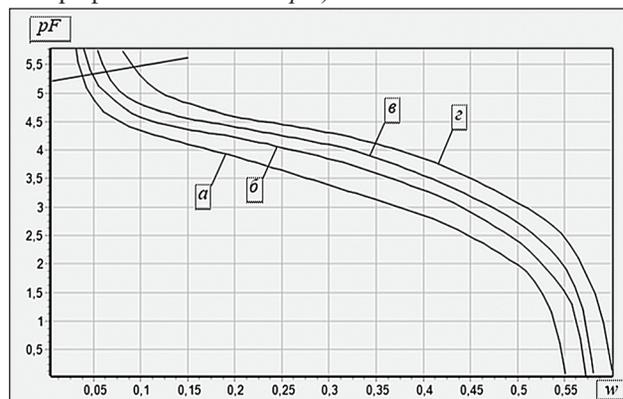


Рис. 1. Кривые ОГХ: а – дерново-подзолистая почва, б – светло-серая лесная почва, в – темно-серая лесная почва, г – чернозем выщелоченный; w – объемная влажность, м³ воды/м³ почвы; pF – всасывающее давление.

Если в почвенной влаге при объемной влажности w имеется некоторое количество соли, то по мере того, как влажность уменьшается до критического значения, часть соли начинает выпадать в осадок. Давление почвенной влаги при этом ослабевает, поскольку из-за снижения концентрации соли, уменьшается и величина компонента ψ''' в формуле (1) и процесс приостанавливается.

По мере дальнейшего высыхания объем влаги уменьшается на Δw , давление почвенной влаги вновь достигает критического уровня и процесс повторяется. Величина p возрастает с уменьшением содержания влаги (см. рис. 1). Это означает, что почвенная влага из соседних слоев будет еще сильнее притягиваться к рассматриваемому участку с повышенной концентрацией солей. С поступающей влагой переносится и растворенная соль, которая затем выпадает в осадок. В итоге ее общая масса возрастает, а скорость этого процесса постепенно снижается, что обусловлено падением как объемной влажности, так и влагопроводности почвы. Замедление поступления влаги с соседних участков почвы приводит к постепенной остановке рассмотренного процесса. Представленный подход позволяет провести численное моделирование перераспределения соли в почве по окончании полива и высыхания. При этом могут учитываться как начальные, так и граничные условия в виде профиля увлажнения по глубине, изменения пористости и удельной поверхности грунтов. Поскольку при моделировании процессов солепереноса используют достаточно производительные современные вычислительные машины, можно реализовать вычисления, задав малые интервалы времени между рассматриваемыми состояниями почвы. Такой подход позволяет отказаться от дифференциальных уравнений Ричардса и использовать метод конечных разностей без больших затрат времени [1, 11].

Равномерная сеточная функция, используемая в алгоритме при задании всех трех координат, имеет $N/N/N$ узлов, учитываемых в расчетах на каждой итерации (повторении расчетов для следующего временного интервала), где N – это количество точек расчета вдоль каждой координаты. При вычислениях применяется следующий алгоритм: в определенные узлы сетки, представляющие собой кубы с длиной ребер $\Delta x = 0,001$ м, подается определенное количество влаги в соответствии с заданными начальными условиями. После этого, согласно законам гидрофизики, пропорционально задаваемому итерацией интервалу времени, определяли перераспределение объемов жидкости между ячейками. Расчет объемов влаги, протекающей между соседними узлами в слоях, основывался на совместном учете величины давления почвенной влаги, полученной из основной гидрофизической характеристики почв и функции влагопроводности. Объемная влажность почвы w – это объем воды в единице объема почвенного пространства. С каждым циклом пересчета эта величина меняется на w^* . В первом приближении ее можно рассматривать как сумму объема уже находящейся в почве воды w_0 с концентрацией хлорида натрия C_0 и объема влаги, поступающей извне w^* с другой концентрацией хлорида натрия C^* .

Для моделирования режимов возникновения «солевой каймы» использовали водный раствор хлорида натрия в дозировке 50 г на 1 л воды. Такой раствор обеспечивает увеличение плотности на 5 %, вязкости – на 2...4 %, осмотического давления – на 13...27 % (по мере высыхания), снижение коэффициента поверхностного натяжения на десятки процентов [15]. При этом все изменения показателей оперативно измеряли стандартными физическими методами и учитывали в основной гидрофизической характеристике и функции влагопроводности.

Табл. 1. Качественные показатели воды*

Наименование		Величина
Органолептические	мутность	ниже чувствительности метода
	цветность	1,82 град
Обобщенные	жесткость	5,7 град Ж
	общая минерализация	431 мг/дм ³
	окисляемость	0,11 мг/дм ³
Неорганические	нитриты	0,0063 мг/дм ³
	нитраты (по NO ₃)	3,02 мг/дм ³
	бор	0,19 мг/дм ³
	железо	0,03 мг/дм ³
	кадмий, свинец, медь, цинк	ниже чувствительности метода
	фториды	0,21 мг/дм ³
	хлороформ	0,0013 мг/дм ³

*по данным ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Чувашской Республике».

Подача воды (табл. 1) с растворенным хлоридом натрия с заданной интенсивностью (фактор, наряду с почвенными характеристиками, влияющий на форму контура увлажнения от параболоида до эллипсоида при капельном орошении) составляла 4 л/ч, время полива – 10 ч. За процессом высыхания наблюдали каждые 2 ч.

Потенциалы почвенной влаги, обусловленные капиллярным и пленочным давлением – ψ' и ψ'' , подходят для описания слабозасоленных почв с общим содержанием водорастворимых солей менее 0,4 %. Однако добавление в формулу (1) компонента ψ''' , обусловленного осмотическим давлением, позволяет устранить это ограничение. Рассмотренный подход позволяет моделировать процессы солепереноса для широкого ряда почв. В нашем исследовании результаты расчета продемонстрированы на примере темно-серых лесных почв (Чебоксарский район, Чувашия, табл. 2).

Табл. 2. Характеристика образцов почвы

Показатель	Величина
Плотность почвы, г/см ³	1,199±0,010
Влажность устойчивого завядания, см ³ воды/см ³ почвы	0,308±0,022
Наименьшая влагоемкость, см ³ воды/см ³ почвы	0,464±0,017
Полная влагоемкость, см ³ воды/см ³ почвы	0,548±0,004
Коэффициент фильтрации, мм/ч	2,773±0,119
Доступная влага, см ³ воды/см ³ почвы	0,156±0,005
Глина, %	52,350±3,255
Ил, %	42,867±3,321
Песок, %	4,783±1,133

Результаты и обсуждение. Пористость и удельная поверхность почвы до глубины 0,5 м изменялись соответственно с 0,63 до 0,52 м³/м³ и с 42 до 46 м²/г в зависимости от слоя. В естественном состоянии (без предварительного полива) профиль влажности обычно таков, что она увеличивается с глубиной. Такое монотонное изменение, без резких границ перехода к более сухим областям, формирует условия, при которых «солевая кайма» не образуется. При этом в горизонтальных направлениях можно найти границы областей переходов от влажной к пересушенной почве. В таких областях прогнозируемо можно ожидать появление «солевой каймы».

Рассмотрим движение поливной воды в радиальных направлениях вдоль поверхности почвы, покрытой коркой, под углом $\theta = (0...5)^\circ$ относительно горизонтальной плоскости (рис. 2). После завершения капельного полива распределение влаги происходит в поле сил тяжести и градиентов давления почвенной влаги. В ходе этого перераспределения образуются области с критическим значением влажности. Здесь происходит «выделение» соли из почвенной влаги, величина объ-

емной влажности при этом снижается, что приводит к уменьшению влагопроводности и увеличению потенциала почвенной влаги.

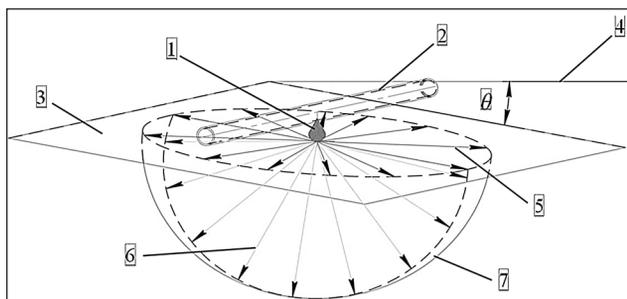


Рис. 2. Схема распределения поливной воды при капельном поливе: 1 – капля воды; 2 – трубка капельницы; 3 – поверхность почвы; 4 – горизонтальная плоскость; 5 – радиальные направления распространения влаги вдоль поверхности почвы; 6 – направления распространения влаги вглубь почвы; 7 – огибающий контур.

Смоделированный процесс солепереноса после капельного полива при $\theta = (0...5)^\circ$, когда формируются области с повышенной концентрацией соли (рис. 3), хорошо согласуется (значения коэффициентов детерминации 0,71...0,83) с ранее полученными результатами экспериментов по изучению влияния начального профиля влажности на объемное распределение солей при удобрительном орошении (фертигации) [11, 12] и на образование области с повышенной концентрацией соли на расстоянии 0,65...0,70 м от места каплевания (локальный участок почвы, соприкасающийся с каплей воды).

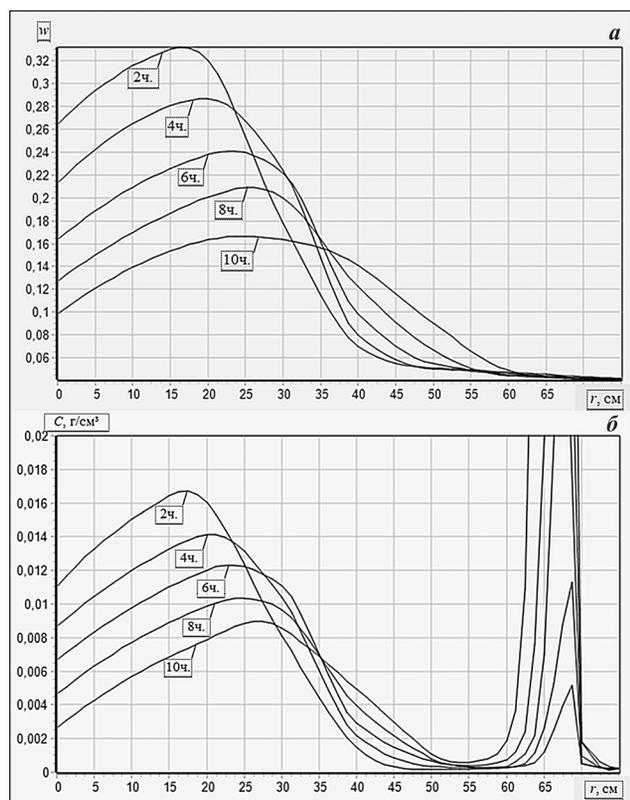


Рис. 3. Формирование «солевой каймы» после капельного полива при $\theta = (0...5)^\circ$: а – зависимость объемной влажности почвы от расстояния места каплевания; б – зависимость концентрации соли от расстояния места каплевания.

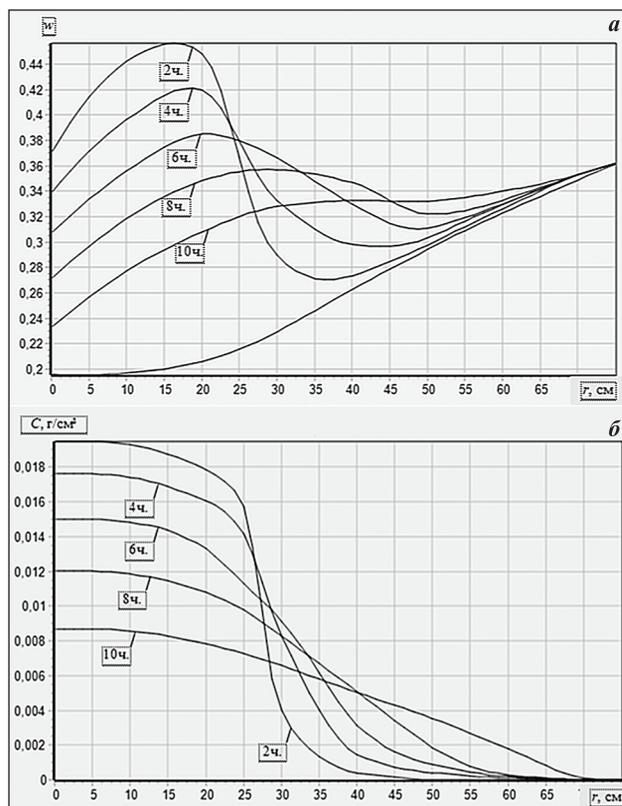


Рис. 4. Отсутствие формирования эффекта «солевой каймы» после капельного полива при $\theta = (10...90)^\circ$: а – зависимость объемной влажности почвы от расстояния места каплевания; б – зависимость концентрации соли от расстояния места каплевания.

Не меняя начальных условий (интенсивность подачи воды с растворенным хлоридом натрия 4 л/ч и временем полива 10 ч), смоделируем солеперенос при распределении воды в радиальных направлениях вдоль поверхности почвы под углом $\theta = (10...90)^\circ$ относительно горизонтальной плоскости (рис. 4). В связи с тем, что поливная вода попадала в изначально более влажную почву, перепады концентраций имеют меньшие градиенты и эффекта образования насыщенной солями области нет.

Выводы. Появление или отсутствие эффекта образования «солевой каймы» определяют условия высыхания почвы, зависящие от начального распределения в ней влаги. Особенности высыхания почвы после удобрительного полива таковы, что соли в основном концентрируются на границе между сухой и влажной почвой – на участке с наибольшим градиентом влажности. Процесс формирования области с повышенной концентрацией соли – «солевая кайма» – заключается в том, что почвенная влага, благодаря возникающему перепаду давления, закачивается в область с уже повышенной концентрацией солей.

Литература

1. Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении / И. А. Успенский, И. В. Фадеев, В. В. Алексеев и др. // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31. № 1. С. 97–108. doi: 10.15507/2658-4123.031.202101.097-108.
2. Водно-физические свойства каштановых почв при разных способах обработки почвы / Н. Н. Дубенок, А. Е. Новиков, А. А. Поддубский и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия:

- Агрономия и животноводство*. 2023. Т. 18. № 1. С. 45–58.
3. Капиллярно-сорбционные эффекты в почве после чизелевания и внесения нетрадиционных удобрений-мелиорантов / В. И. Пындак, А. Е. Новиков, В. Н. Штепа и др. // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2016. № 3 (43). С. 252–257.
 4. Юсупов М., Аминов С. М., Саидов У. М. Численное моделирование задачи солепереноса в почвогрунтах // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2020. № 1 (25). С. 85–93.
 5. Кравченко Е. И., Хитров Н. Б., Горохова И. Н. Распределение засоленных орошаемых почв в район Сарпинской ложбины Прикаспийский низменности // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*. 2021. Вып. 106. С. 5–48. doi: 10.19047/0136-1694-2021-106-5-48.
 6. Properties of sod-podzolic soil in European Russia with drip irrigation of the fruit nursery / N. N. Dubenok, A. V. Gemonov, A. V. Lebedev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 012108. URL: https://www.researchgate.net/publication/360034690_Properties_of_sod-podzolic_soil_in_European_Russia_with_drip_irrigation_of_the_fruit_nursery (дата обращения: 20.09.2023). doi: 10.1088/1755-1315/1010/1/012108.
 7. Кизяев Б. М., Максименко В. П., Губин В. К. Водосберегающие технологии промывки засоленных почв // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2016. № 4. С. 38–43.
 8. Попова В. П., Фоменко Т. Г., Макарова А. А. Оценка влияния капельного орошения минерализованными водами на изменение свойств чернозема обыкновенного и состояние насаждений яблони // *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2021. № 67 (1). С. 226–241. doi: 10.30679/2219-5335-2021-1-67-226-241.
 9. Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (республика Калмыкия) / К. О. Прокопьева, М. В. Конюшкова, Н. М. Новикова и др. // *Аридные экосистемы*. 2021. Т. 27. № 2 (87). С. 68–81. doi: 10.24411/1993-3916-2021-10152.
 10. Кравченко Е. И., Хитров Н. Б., Горохова И. Н. Двумерное распределение засоления орошаемых почв рядом с оросительным каналом на участке «Червленое» Светлярской оросительной системы // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*. 2018. Вып. 94. С. 19–37. doi: 10.19047/0136-1694-2018-94-19-37.
 11. Влияние фертигации на засоление почвы / Б. Г. Зиганишин, И. Г. Галиев, Р. К. Хусаинов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 15. № 4 (60). С. 67–70.
 12. Modeling the transfer of potassium monophosphate with irrigation water in drip irrigation and sprinkling / V. Alekseev, R. Alexandrov, S. Vasiliev et al. // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science*. 2020. 05010. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2020/25/mateconf_icmtmte2020_0501.pdf (дата обращения: 20.09.2023). doi: 10.1051/mateconf/202032905010.

Поступила в редакцию 01.06.2023

После доработки 14.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023