

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕЛИОРАТИВНО- ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Научная статья

УДК 631.43

Имитационное моделирование фильтрационных процессов на мелиоративных системах двустороннего действия

Пётр Владимирович Чернов¹, Дмитрий Кириллович Зотов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

¹pchelkadragepet@mail.ru

²zotovdk@gmail.com

Аннотация. Цель: определение возможности компьютерного моделирования водно-воздушного режима почвогрунтов ненасыщенной зоны и динамики уровня грунтовых вод (УГВ) в междренном пространстве на осушительно-увлажнительных системах. **Материалы и методы.** В рамках проведенного исследования была использована имитационная модель, исследованы фильтрационные процессы и динамика водно-воздушного режима почвогрунтов на осушительно-увлажнительных системах Северо-Запада России в насыщенной и ненасыщенной зонах. Использована трехмерная конечно-элементная модель массопереноса в пористых средах FEMWATER, позволяющая учитывать специфические особенности исследуемой территории. Исходными данными для калибровки являются результаты экспериментов, направленных на изучение динамики УГВ в режиме подпочвенного увлажнения – осушения, выполненные на опытно-производственном участке «Шиповский», Калининградская область. **Результаты.** В ходе анализа была получена хорошая корреляция ($r_{xy} > 0,75$) экспериментальных и расчетных результатов. Коэффициент эффективности модели Нэша–Сатклиффа $NSE = 0,80$ характеризуется как высокий. Работа продемонстрировала возможность успешного компьютерного моделирования динамики уровня грунтовых вод (УГВ) и давления почвенной влаги в зоне аэрации на осушительно-увлажнительных системах. **Выводы.** Имитационное моделирование с использованием конечно-элементной модели массопереноса в пористых средах FEMWATER при достаточном опытно-экспериментальном обеспечении способно значительно повысить эффективность исследования водно-воздушного режима на комбинированных мелиоративных системах для разработки управленческих рекомендаций в различных погодных условиях, в том числе и в режиме реального времени. Работа может служить основой для дальнейших исследований в области мелиорации и устойчивого управления водными ресурсами.

Ключевые слова: гумидная зона, осушительно-увлажнительная система, водный режим, зона аэрации, уровень грунтовых вод, математическое моделирование

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» (г. Новочеркасск, 10 октября 2025 г.).

Для цитирования: Чернов П. В., Зотов Д. К. Имитационное моделирование фильтрационных процессов на мелиоративных системах двустороннего действия // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 91–107.

MODERN PROBLEMS OF LAND RECLAMATION AND WATER INDUSTRIAL COMPLEX AND WAYS TO SOLVE THEM

Original article

Simulation modeling of filtration processes in double-acting reclamation systems

Peter V. Chernov¹, Dmitrij K. Zotov²

¹All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneev,
Saint-Petersburg, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

¹pchelkadragnet@mail.ru

²zotovdk@gmail.com

Abstract. Purpose: to determine the feasibility of computer simulation of the air-water regime of soils in the unsaturated zone and the groundwater level (GWL) dynamics in the interdrain space of complex irrigation systems. **Materials and methods.** The simulation model to investigate filtration processes and the air-water regime dynamics of soils in complex irrigation systems in the saturated and unsaturated zones of the Northwest Russia was used. A three-dimensional finite element model of mass transfer in porous media, FEMWATER taking into account the specific features of the study area was applied. The initial calibration data were the result of experiments aimed at studying the GWL dynamics in the subsurface wetting-drainage regime, conducted at the Shipovsky pilot site, Kaliningrad Region. **Results.** A good correlation ($r_{xy} > 0.75$) between the experimental and calculated results was obtained during the analyses. The Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient ($NSE = 0.80$) is considered high. This study demonstrated the feasibility of successful computer simulation of groundwater level (GWL) dynamics and soil moisture pressure in the aeration zone of complex irrigation systems. **Conclusions.** Simulation modeling using the FEMWATER finite element model of mass transfer in porous media, with sufficient experimental support, can significantly improve the effectiveness of air-water regime studies in combined reclamation systems for the development of management recommendations under various weather conditions, including in real time. This study can serve as a basis for further research in the field of land reclamation and sustainable water resources management.

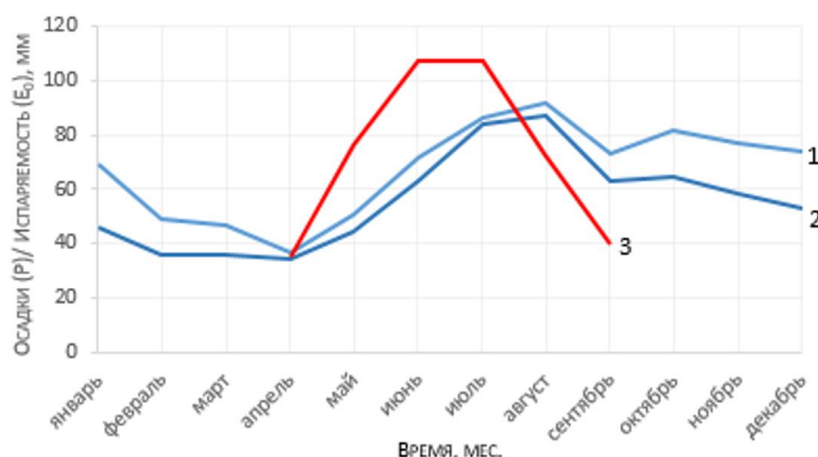
Keywords: humid zone, drainage and humidification system, water regime, aeration zone, groundwater level, mathematical simulation

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the All-Russian scientific and practical conference “Modern problems of land reclamation and water industrial complex and ways to solve them” (Novocherkassk, October 10, 2025).

For citation: Chernov P. V., Zotov D. K. Simulation modeling of filtration processes in double-acting reclamation systems. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025;97(3):91–107. (In Russ.).

Введение. Северо-Запад России находится в зоне гумидного климата, который характеризуется превышением среднегодового количества осадков (P_{200}) над суммарным испарением (E_{200}). Коэффициент испаряемости для этого региона $E_{200}/P_{200} < 1$, что соответствует зоне достаточного

увлажнения, причем значительная часть территории находится в зоне избыточного увлажнения (коэффициент испаряемости $E_{год}/P_{год} < 0,78$) [1]. Это вызывает необходимость в сельскохозяйственном производстве для создания необходимых условий при проведении работ и обеспечения приемлемого водно-воздушного режима для роста и развития растений искусственно отводить избыточную влагу, применяя для этого дренажные системы. Однако в течение теплого периода года, как правило, с мая по сентябрь, суммарное испарение (эвапотранспирация) становится больше суммы осадков за этот же период (рисунок 1), что может приводить к периодической нехватке влаги в корнеобитаемом слое и, как следствие, снижению урожайности. В этом случае целесообразно использовать искусственное орошение. Существует оптимальный интервал почвенной влаги, при котором достигается максимальный урожай. Отклонение влажности в активном корнеобитаемом слое от оптимального в обе стороны приводит к потере урожая. По этой причине в практике находят применение комбинированные системы управления водным режимом: осушительно-оросительные и осушительно-увлажнительные. В первом случае используется орошение дождеванием. При этом, как правило, дренажные и ирригационные элементы этой системы технически не связаны друг с другом и выполняют свои функции автономно. Во втором случае производится подпочвенное увлажнение за счет повышения напора в дренах. Уровень в устьях дрен поддерживается шлюзованием магистральных каналов и, при необходимости, подачи в них дополнительного объема воды. Проектированию и расчетам мелиоративных систем двустороннего регулирования посвящено значительное количество работ и обзоров [2–5]. Однако вопрос определения уровня грунтовых вод (УГВ) и влагозапасов в почве при различных погодных условиях в произвольный момент времени рассмотрен недостаточно.



1 – Калининградская область; 2 – Ленинградская область; 3 – Северо-Запад России
1 – Kaliningrad region; 2 – Leningrad region; 3 – North-West of Russia

Рисунок 1 – Среднемесячные суммы выпавших осадков (1975–2024) и усредненные среднесезонные месячные значения испаряемости за теплый период года (адаптировано по [1])

Figure 1 – Average monthly precipitation amounts (1975–2024) and average long-term monthly evaporation values for the warm period of the year (adapted from [1])

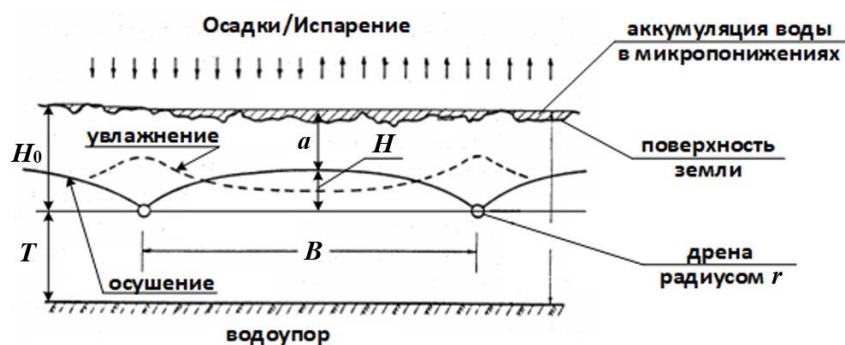
Почвенные влагозапасы корнеобитаемого слоя определяются водным балансом территории и могут быть рассчитаны на основании его уравнения и закона Дарси (для насыщенной и ненасыщенной зоны). Однако стохастическая природа климатических параметров вносит высокую неопределенность в формирование водно-воздушного режима. На фоне закрытого дренажа значительную пространственную неоднородность режима вызывает криволинейная поверхность грунтовых вод, так как УГВ за счет капиллярных сил во многом определяет влажность почвогрунтов зоны аэрации. Еще более усложняется процесс изменения влажности при комбинированном, осушительно-увлажнительном регулировании водного режима на этапе увлажнения, т. е. при повышении УГВ. Физико-математические основы фильтрации хорошо изложены, например, в [6, 7]. Однако фильтрационные процессы применительно к осушительно-увлажнительным системам рассмотрены недостаточно, в то время как для принятия управленческих решений сельскохозяйственным производителям необходимы основанные на практике рекомендации по регулированию водного режима в различных условиях.

Материалы и методы. В настоящее время в рамках метода системных исследований основным инструментом получения знаний признано имитационное моделирование. Для агромелиоративной системы моделирование позволяет на основе натурных полевых опытов, как правило, длительных и дорогостоящих, выполнить на численной модели объекта эксперименты для различных природно-технических условий [8, 9]. Адекватность результата зависит от точности определения феноменологических параметров модели (таких, как коэффициент фильтрации / влагопроводности для насыщенной и ненасыщенной зон, УГВ, физико-механические свойства почв), которые получают в полевых или лабораторных исследованиях; соответствия используемых в модели гидрометеорологических параметров (чаще всего полученных на ближайшей метеостанции) реальной гидрометеорологической обстановке на объекте исследования и адекватности заложенных в модель теоретических положений.

Целью представленной работы являлось определение возможности компьютерного моделирования водно-воздушного режима почвогрунтов ненасыщенной зоны и динамики УГВ в междренном пространстве на осушительно-увлажнительных системах. Для этого были поставлены следующие задачи:

- выбрать компьютерную программу фильтрационных расчетов;
- проанализировать имеющиеся литературные экспериментальные данные;
- на их основе разработать расчетную схему, провести калибровку и валидацию модели;
- выполнить гидродинамическое компьютерное моделирование;
- сделать выводы о возможности моделирования водного режима на мелиоративных осушительно-увлажнительных системах.

Принципиальная схема области моделирования фильтрационных процессов представлена на рисунке 2.



H_0 – глубина заложения дрен; a – глубина от земной поверхности до уровня грунтовых вод; H – глубина залегания грунтовых вод над дренаем; T – глубина залегания дрена; B – расстояние между дренами
 H_0 – is the drain laying depth; a – is the depth from the earth's surface to the groundwater level; H – is the groundwater depth above the drain; T – is the drain depth; B – is the distance between the drains

**Рисунок 2 – Принципиальная схема области моделирования
 фильтрационных процессов к расчету дренажа (адаптировано по [10]),
 показывающая положение уровня грунтовых вод
 при режимах осушения / увлажнения**

**Figure 2 – Schematic diagram of the simulation area of filtration processes
 for drainage calculation (adapted from [10]), showing the position of
 the groundwater level under drying / moistening conditions**

В качестве инструмента компьютерного моделирования была выбрана известная трехмерная конечно-элементная модель гидродинамических расчетов движения грунтовых вод FEMWATER [11], которая моделирует поток и массоперенос как в насыщенных, так и в ненасыщенных пористых средах. В модели, в зависимости от плотности жидкости, характеристик гидравлической проводимости, начальных и граничных условий, может быть решено уравнение влагопереноса (1), которое является модифицированным уравнением Ричардса:

$$\frac{\rho}{\rho_0} F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \left[K \left(\frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right] + \frac{\rho^*}{\rho} q, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды при концентрации растворенных веществ c ;

ρ_0 – исходная плотность воды при $c = 0$;

F – водоотдача;

h – напор;

t – время;

∇ – оператор набла;

K – тензор гидравлической проводимости (коэффициент фильтрации / влагопроводности);

z – потенциальный напор;

ρ^* – плотность либо закачиваемой, либо отбираемой воды;

q – объемный расход источника и/или стока.

Начальные условия для уравнения фильтрации задаются уравнением (2):

$$h = h_i(x, y, z), \quad (2)$$

где h_i – заданное начальное распределение напора, которое может быть получено либо с помощью полевых измерений, либо путем решения стационарного варианта уравнения (1).

Граничные условия, поддерживаемые FEMWATER, включают точечные источники / стоки, условие Дирихле (заданный напор), поток, градиент потока и переменные границы (осадки / испарение и просачивание).

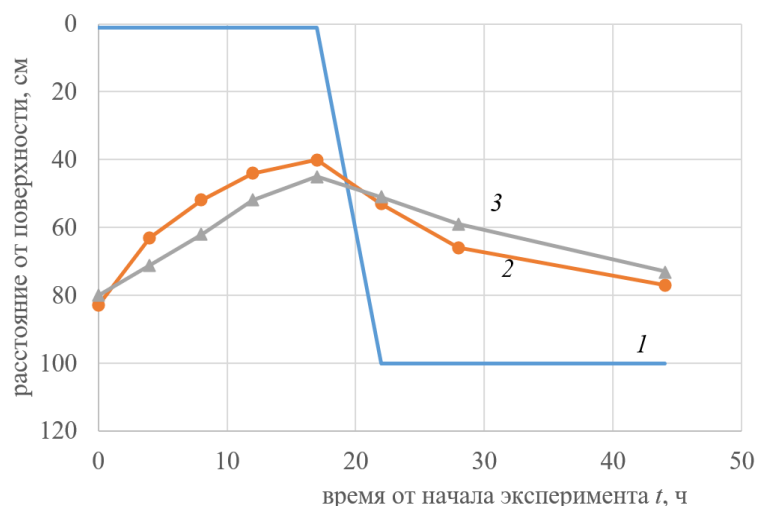
Начально-краевая задача, описываемая управляющими уравнениями потока и транспортного модуля FEMWATER, а также граничными условиями, в общем случае не может быть решена аналитическими методами математики. Следовательно, для решения этих наборов управляющих уравнений численные методы являются единственными математическими инструментами, способными справиться с этой задачей. Существует два наиболее распространенных численных метода, которые могут быть использованы для решения наиболее простой формы управляющих уравнений. Это методы конечных разностей и конечных элементов. Основное различие между ними заключается в том, что метод конечных элементов основан на аппроксимации функции, в то время как метод конечных разностей основан на аппроксимации производных функции. Таким образом, метод конечных разностей дает решения только в дискретных точках, в то время как метод конечных элементов дает пространственно-непрерывные решения.

Для достижения в результате компьютерных экспериментов на имитационной модели объекта результатов, адекватных реальным физическим процессам по известным экспериментальным данным, выполняются процедуры ее калибровки и валидации. Целью калибровки является уточнение феноменологических коэффициентов модели для получения расчетных результатов, хорошо коррелируемых с экспериментальными. В свою очередь, валидация – это непосредственное сравнение полученных результатов расчетов с известными экспериментальными данными. Задачей калибровки и валидации не является подгонка расчетных результатов к экспериментальным, так как последние не могут быть названы абсолютно точными вследствие высокой пространственной изменчивости водно-физических и механических свойств почвогрунтов (феноменологических коэффициентов имитационной модели), дискретности измерений и ошибок эксперимента. Возможность применения компьютерной модели для моделирования определенного физического процесса оценивают, исходя из доверительного интервала сравниваемых данных и корреляции результатов полевых и компьютерных экспериментов. Связь между ними принимают высокой при значении коэффициента корреляции $r_{xy} > 0,75$ (0,70) [12, 13]. Еще одним критерием оценки, активно используемым в гидрологии в последние десятилетия, является коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклиффа (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE)) [14]. NSE изменяется от $-\infty$ до 1,0. Хорошей эффективностью модели соответствует $NSE > 0,70-0,80$.

Для проверки возможности моделирования влагопереноса на системах двустороннего действия в режиме увлажнения – осушения были использованы данные, представленные в [15]. Опытно-производственный участок «Шиповский», на котором проводился эксперимент, расположен в Калининградской области. Мелиоративная система предусматривает двустороннее регулирование водного режима: 1) осушение (100 % территории); 2) подпочвенное увлажнение / орошение дождеванием (на отдельных участках). Регулирующая сеть представлена закрытым дренажем с глубиной

заложения дрен 0,98 м, расстояние между дренами 10,5 м. Проводящая – закрытыми коллекторами. Для подпочвенного увлажнения была организована подача воды от насосной станции в коллектор. Верхний слой почвенного разреза мощностью 2,2 м представлен торфами разной степени разложения с коэффициентом фильтрации $K\phi = 1,5$ м/сут.

В ходе эксперимента по подпочвенному увлажнению-осушению в начальный момент времени $t_0 = 0$ напор в устье дрен был установлен на уровне поверхности, а средняя отметка УГВ в середине междреннего пространства находилась на глубине 0,83 м от поверхности. Изменения напора на дрене и среднее измеренное значение УГВ в середине междреннего расстояния представлены на рисунке 3 (линии 1 и 2). Стандартное отклонение УГВ составляет $\approx \pm(3-6)$ см.



- 1 – напор на дрене, УГВ в середине междреннего расстояния;
 2 – измеренный (среднее значение по данным [14]); 3 – рассчитанный в FEMWATER
 1 – water head on the drain, groundwater level in the middle of the inter-drain distance;
 2 – measured (average value according to data [14]); 3 – calculated in FEMWATER

Рисунок 3 – Эксперимент по регулированию УГВ

Figure 3 – Experiment on regulating the groundwater level

Результаты исследования. По данным эксперимента была разработана расчетная схема. Задача решалась как плоская, в координатах (x, z) . Шаг регулярной конечно-элементной сетки по горизонтали – 0,5 м; по вертикали – 0,1 м. За нулевую отметку принята поверхность земли. Граничные

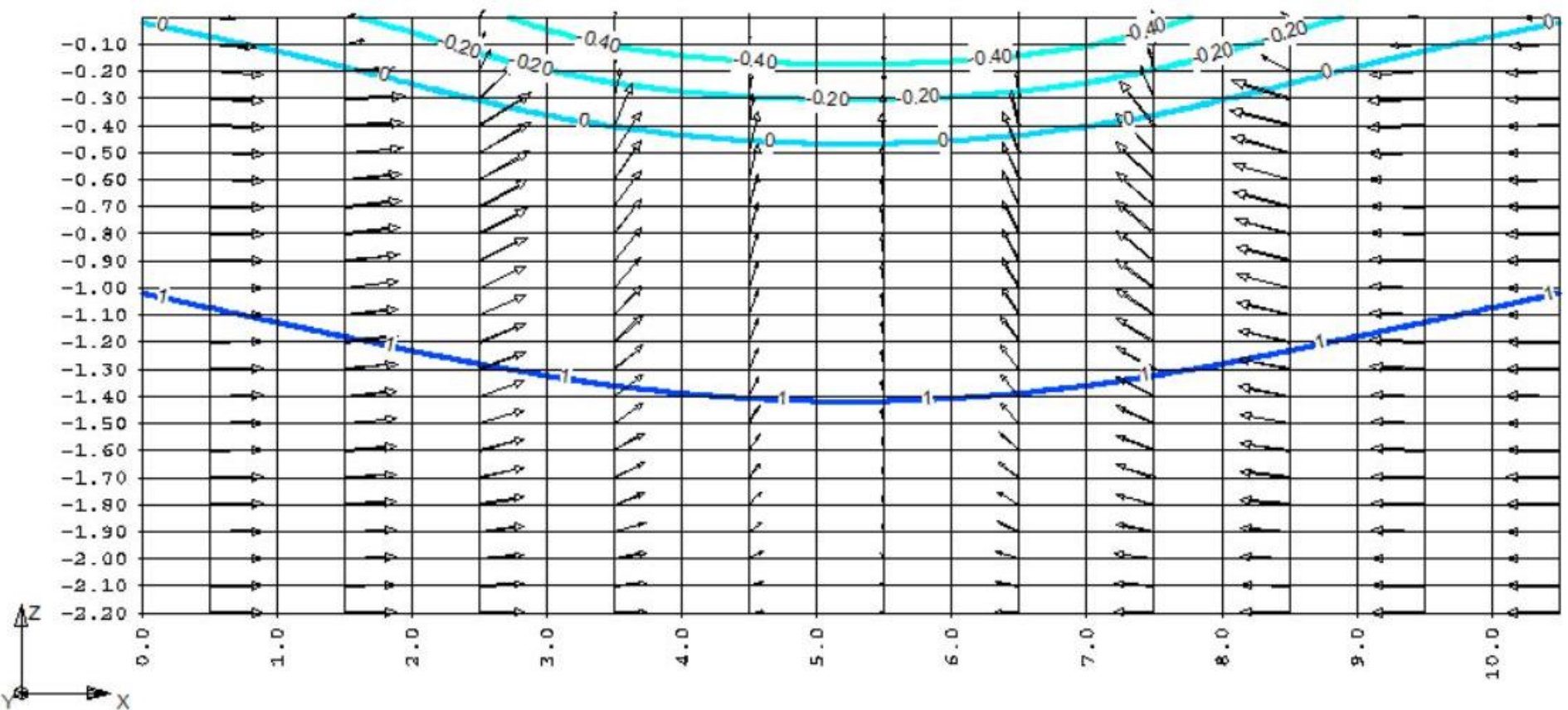
условия – переменный напор на дрене (рисунок 3, линия 1). Начальные условия – значение напора в начальный момент времени $h(t_0) = -0,83$ м. В модели не учтены инфильтрация и эвапотранспирация. Последнее упрощение является вынужденным в связи с отсутствием данных. В действительности эти параметры могут вносить значительный вклад, например, интенсивность инфильтрации и эвапотранспирация могут составлять 2–6 мм/сут [16].

Валидация модели выполнена по значениям УГВ в различные моменты времени. Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунке 3 (линия 3). Визуальное сравнение графиков изменения УГВ в середине междренного расстояния показывает схожие качественные и количественные показатели измеренных и рассчитанных данных в процессе увлажнения – осушения. Коэффициент корреляции (r_{xy}) измеренных и рассчитанных значений УГВ составил 0,82, что говорит о высокой связи переменных. Коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклиффа $NSE = 0,80$, показывая ее высокую эффективность.

Зависимости влагопроводности и водоудерживания для торфяной почвы в ненасыщенной зоне были получены с помощью встроенного в программу генератора соответствующих кривых на основе информации, представленной в [17]. Следует отметить, что данные по водно-воздушному режиму, полученные для ненасыщенной зоны, носят, в большей степени, качественный характер. Дело в том, что в торфяных почвах формирование водного режима значительно отличается от минеральных почв и в настоящее время еще недостаточно исследовано. Тем не менее, полученные результаты могут быть признаны адекватными реальным почвенным процессам увлажнения – осушения.

Давление почвенной влаги в ненасыщенной зоне в ходе компьютерного моделирования находилось в интервале от 0 до $-1,0$ м вод. ст. ($pF = 0-2$). Распределение гидростатического напора и давления почвенной влаги в различные моменты времени представлены на рисунке 4.

a)



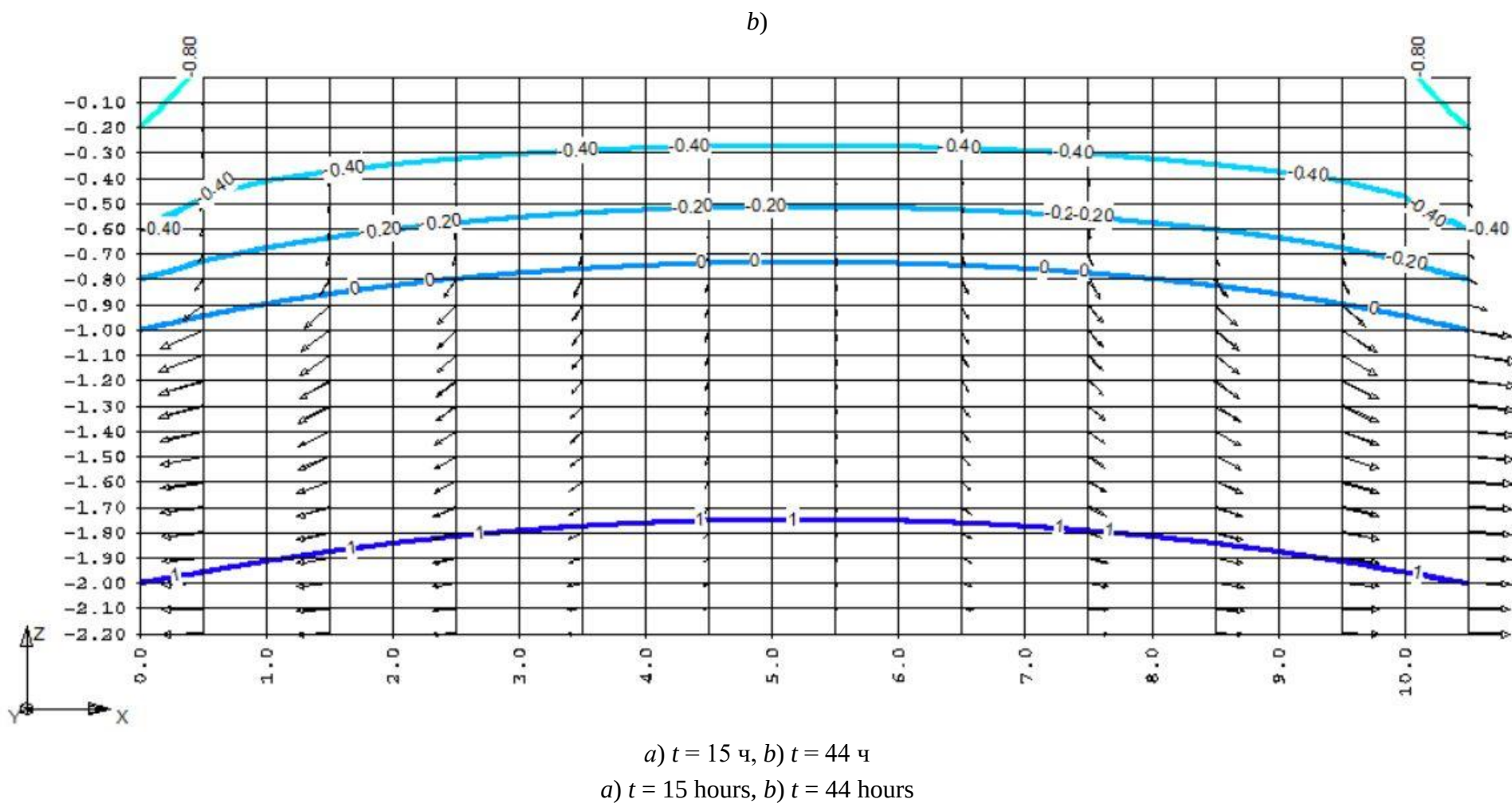


Рисунок 4 – Гидростатический напор и давление почвенной влаги
Figure 4 – Hydrostatic head and soil moisture pressure

УГВ соответствует нулевая гидроизогипса. Стрелками на рисунке 4 обозначены векторы скорости потока в узлах расчетной сетки. Длина вектора пропорциональна величине скорости. Напор на дрене $-0,02$ м в режиме увлажнения, $1,00$ м – осушения.

Выводы. Выполненное исследование показало, что имитационное моделирование является перспективным инструментом для исследования и разработки рекомендаций по регулированию водно-воздушного режима почв на закрытых осушительно-увлажнительных системах Северо-Запада России. Коэффициент корреляции, рассчитанный в программе FEMWATER, значений УГВ в междренном пространстве с экспериментальными данными $r_{xy} > 0,75$ характеризует высокую связь между переменными, а коэффициент Нэша – Сатклиффа $NSE = 0,80$ показывает высокую степень эффективности модели.

При планировании и проведении полевых экспериментов на осушительно-увлажнительных системах необходимо предусматривать сбор и обработку данных с учетом возможности их совместимости и использования в имитационных моделях.

В качестве исходных данных для имитационного моделирования могут быть использованы архивные данные и результаты экспериментов на мелиоративных осушительно-увлажнительных системах, выполненные в 1970-80-е гг., периода высокого научно-методического уровня проведения мелиоративных исследований, но отсутствия современных возможностей математического моделирования.

FEMWATER позволяет учесть влагоперенос непосредственно в ненасыщенной зоне (от УГВ до поверхности) как области, которая непосредственно влияет на доступность влаги и растворенных питательных веществ корням растений.

Имитационное моделирование при достаточном опытно-экспериментальном обеспечении способно значительно повысить эффективность ис-

следования водно-воздушного режима на комбинированных мелиоративных системах для разработки управленческих рекомендаций в различных погодных условиях, в том числе и в режиме реального времени.

Список источников

1. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Кулешова А. В. Особенности межгодовой изменчивости увлажнения на европейской территории России // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. 2020. С. 188–189. EDN: PYAWWL.
2. Зубец В. М., Еськов А. И. Мелиоративные системы двустороннего действия. Минск: Ураджай, 1980. 162 с.
3. Кожанов А. Л. К вопросу расчета совмещенной осушительно-увлажнительной сети // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2021. № 1(81). С. 128–135. EDN: RKMPZZ.
4. Маслов Б. С., Станкевич В. С., Черненко В. Я. Осушительно-увлажнительные системы // М.: Колос. 1981. 280 с.
5. Осушительные системы двухстороннего действия: научный обзор / С. М. Васильев, В. Н. Щедрин, А. Л. Кожанов, О. В. Воеводин, В. В. Слабунов, А. С. Штанько, С. Л. Жук. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2018. 117 с. EDN: PJMHYN.
6. Анискин Н. А., Сергеев С. А. Численные решения задач неустановившейся фильтрации в гидротехнике // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1478–1487. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1478-1487. EDN: EHOMHW.
7. Береславский Э. Н., Прирез А. В. О влиянии испарения или инфильтрации на свободную поверхность грунтовых вод в некоторых задачах подземной гидромеханики / Э. Н. Береславский, А. В. Прирез // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докладов II Междунар. форума, г. Санкт-Петербург, 09 нояб. 2022 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 77–85. EDN NHMMQL.
8. Статистическое сравнение результатов определения гранулометрического состава седиментометрическим методом (ISP+) с методом лазерной дифрактометрии / Е. В. Шеин, А. В. Дембовецкий, З. Н. Тюгай, Ж. Жансая // Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы: сб. науч. тр. II Междунар. междисциплинарной науч. конф., Москва, 25–31 мая 2024 г. М.: Издательский дом КДУ, 2024. С. 559–565. EDN: CGUFVI.
9. DRAINMOD modeling framework for simulating controlled drainage effect on lateral seepage from artificially drained fields / M. A. Youssef [et al.] // Agricultural Water Management. 2021. Vol. 254. P. 106944. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106944. EDN: QYVIJP.
10. Nguyen, H.V., Cheng, J.R.C., Maier, R.S. Study of Parallel Linear Solvers for Three-Dimensional Subsurface Flow Problems // Computational Science–ICCS 2009. Lecture Notes in Computer Science. Berlin-Heidelberg: Springer, 2009. Vol. 5544. P. 785–794. DOI: 10.1007/978-3-642-01970-8_78.
11. Баврина А. П., Борисов И. Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах. 2021. № 3(68). С. 70–79. EDN: TPSSIX.
12. Melsen L. A. [et al]. The rise of the Nash-Sutcliffe efficiency in hydrology // Hydrological Sciences Journal. 2025. Vol. 70. P. 1–12. DOI: 10.1080/02626667.2025.2475105.
13. Duc L., Sawada Y. A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency // Hydrology and Earth System Sciences. 2023. Vol. 27. No. 9. P. 1827–1839. DOI: 10.5194/hess-27-1827-2023. EDN: IFJFUU.

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 91–107.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 91–107.

14. Şen Z., Şişman E., Kızılöz B. A new innovative method for model efficiency performance // *Water Supply*. 2021. Vol. 22. P. 589–601. DOI: 10.2166/ws.2021.245.

15. Федоров С. В., Ковалев В. П. Мелиоративная система двустороннего действия, экспериментальный участок «Шиповский» // *Водопользование и задачи гидромеханики*. 2015. С. 88–94. EDN: VXSLMT.

16. Криулин К. Н., Чернов П. В. О расчете систематического дренажа в регионе Санкт-Петербург-Ленинградская область // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. 2019. Т. 293. С. 26–34. EDN: ZXMWIH.

17. Букин А. В., Санникова Н. В. Водно-физические свойства органических удобрений и влагоудерживающих сорбентов // *Молодежная наука для развития АПК: сб. тр. LX Студенческой науч.-практ. конф., г. Тюмень, 14 нояб. 2023 г. Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2023. С. 10–14. EDN: SHNTUN.*

References

1. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Kuleshova A.V., 2020. *Osobennosti mezhgodovoy izmenchivosti uvlazhneniya na evropeyskoy territorii Rossii* [Features of interannual variability of humidification in the European territory of Russia]. *Sovremennye problemy gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchey sredy na prostranstve SNG* [Current Issues of Hydrometeorology and Environmental Monitoring in the CIS], pp. 188-189, EDN: PYAWWL. (In Russian).

2. Zubets V.M., Eskov A.I., 1980. *Meliorativnye sistemy dvustoronnego deystviya* [Double-Acting Reclamation Systems]. Minsk, Urajay Publ., 162 p. (In Russian).

3. Kozhanov A.L., 2021. *K voprosu rascheta sovmeshchennoy osushitel'no-uvlazhnitel'noy seti* [On issue of calculating a complex irrigation network]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 1(81), pp. 128-135, EDN: RKMPZZ. (In Russian).

4. Maslov B.S., Stankevich V.S., Chernenok V.Ya., 1981. *Osushitel'no-uvlazhnitel'nye sistemy* [Complex Irrigation Systems]. Moscow, Kolos Publ., 280 p. (In Russian).

5. Vasilyev S.M., Shchedrin V.N., Kozhanov A.L., Voevodin O.V., Slabunov V.V., Shtanko A.S., Zhuk S.L., 2018. *Osushitel'nye sistemy dvukhstoronnego deystviya: nauchnyy obzor* [Double-Acting Drainage Systems: Scientific Review]. Novocherkassk: RosNIIPM, 117 p., EDN: PJMHYH. (In Russian).

6. Aniskin N.A., Sergeev S.A., 2022. *Chislennye resheniya zadach neustanovivsheysya fil'tratsii v gidrotekhnike* [Numerical solutions to unsteady filtration problems in hydraulic engineering]. *Vestnik MGSU* [Bullet. of MGSU], vol. 17, no. 11, pp. 1478-1487, DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1478-1487, EDN: EHOMHW. (In Russian).

7. Bereslavsky E.N., Prirez A.V., 2022. *O vliyanii ispareniya ili infil'tratsii na svobodnuyu poverkhnost' gruntovykh vod v nekotorykh zadachakh podzemnoy gidromekhaniki* [Effect of evaporation or infiltration on the free surface of groundwater in certain problems of underground hydromechanics]. *Matematicheskie metody i modeli v vysoko-tekhnologichnom proizvodstve: sb. tez. dokladov II Mezhdunar. foruma* [Mathematical Methods and Models in High-Tech Production: Collection of Abstracts of the II International Forum]. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, pp. 77-85, EDN NHMMQL. (In Russian).

8. Shein E.V., Dembovetsky A.V., Tyugay Z.N., Zhansaya Zh., 2024. *Statisticheskoe sravnenie rezul'tatov opredeleniya granulometricheskogo sostava sedimentometricheskim metodom (ISP+) s metodom lazernoy difraktometrii* [Statistical comparison of the results of determining the particle size distribution by the sedimentometric method (ISP+) with the laser diffractometry method]. *Fundamental'nye kontseptsii fiziki pochv: razvitie, sovremennyye*

prilozheniya i perspektivy: sb. nauch. tr. II Mezhdunar. mezhdistsiplinarnoy nauch. konf., [Fundamental Concepts of Soil Physics: Development, Modern Applications and Prospects: collect. of scientific papers of the II International Interdisciplinary Scientific Conf.]. Moscow, KDU Publ., pp. 559-565, EDN: CGUFVI. (In Russian).

9. Youssef M.A. [et al.], 2021. DRAINMOD modeling framework for simulating controlled drainage effect on lateral seepage from artificially drained fields. *Agricultural Water Management*, vol. 254, article number 106944, DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106944, EDN: QYVIJP.

10. Nguyen H.V., Cheng JR.C., Maier R.S., 2009. Study of Parallel Linear Solvers for Three-Dimensional Subsurface Flow Problems. *Computational Science–ICCS 2009. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin-Heidelberg: Springer, vol. 5544, pp. 785-794, DOI: 10.1007/978-3-642-01970-8_78.

11. Bavrina A.P., Borisov I.B., 2021. [Modern rules of the application of correlation analysis]. *[Medical Almanac]*, no. 3(68), pp. 70-79, EDN: TPSSIX. (In Russian).

12. Melsen L.A. [et al.], 2025. The rise of the Nash-Sutcliffe efficiency in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 70, pp. 1-12, DOI: 10.1080/02626667.2025.2475105.

13. Duc L., Sawada Y., 2023. A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 27, no. 9, pp. 1827-1839, DOI: 10.5194/hess-27-1827-2023, EDN: IFJFUU.

14. Şen Z., Şişman E., Kızıloğ B., 2021. A new innovative method for model efficiency performance. *Water Supply*, vol. 22, pp. 589-601, DOI: 10.2166/ws.2021.245.

15. Fedorov S.V., Kovalev V.P., 2015. *Meliorativnaya sistema dvustoronnego deystviya, eksperimental'nyy uchastok «Shipovskiy»* [Double-action reclamation system, experimental site "Shipovsky"]. *Vodopol'zovanie i zadachi gidromekhaniki* [Water Use and Hydro-mechanics Tasks], pp. 88-94, EDN: VXSLMT. (In Russian).

16. Kriulin K.N., Chernov P.V., 2019. *O raschete sistematicheskogo drenazha v regione Sankt-Peterburg-Leningradskaya oblast'* [On calculation of systematic drainage in the St. Petersburg-Leningrad region]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. Ye. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedenev], vol. 293, pp. 26-34, EDN: ZXMWIH. (In Russian).

17. Bukin A.V., Sannikova N.V., 2023. *Vodno-fizicheskie svoystva organicheskikh udobreniy i vlagouderzhivayushchikh sorbentov* [Water-physical properties of organic fertilizers and water-retaining sorbents]. *Molodezhnaya nauka dlya razvitiya APK: sb. tr. LX Studentcheskoy nauch.-prakt. konf.* [Youth Science for the Development of the Agro-Industrial Complex: Collection of Works of the LX Student Scientific-Practical Conference]. Tyumen, State Agrarian University of the Northern Trans-Urals, pp. 10-14, EDN: SHNTUN. (In Russian).

Информация об авторах

П. В. Чернов – инженер, Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, pchelkadragepet@mail.ru, AuthorID: 986600;

Д. К. Зотов – ведущий программист, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, zotovdk@gmail.com, AuthorID: 858020.

Information about the authors

P. V Chernov – Engineer, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedenev, Saint-Petersburg, Russian Federation, pchelkadragepet@mail.ru; AuthorID: 986600;

D. K. Zotov – Lead Programmer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, zotovdk@gmail.com, AuthorID: 858020.

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 91–107.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 91–107.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 17.10.2025;
принята к публикации 20.11.2025.*

*The article was submitted 29.09.2025; approved after reviewing 17.10.2025; accepted for
publication 20.11.2025.*