

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851>



УДК 631.6

Повышение эффективности управления водопользованием оросительных систем: методология и технология

© 2025. Д. А. Рогачев ✉

ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова», г. Москва, Российская Федерация

Цель исследования – усовершенствовать управление системным водопользованием для повышения эффективности управляющих воздействий в условиях ограничения природных ресурсов и финансирования эксплуатационных мероприятий. Материалом исследований служили публикации, фондовые материалы; сведения о работе межхозяйственных оросительных систем, технологиях назначения и критериях оценки эффективности управленческих решений; правила распределения воды и другие материалы, необходимые для достижения цели исследования. В ходе работы для оптимизации технологических процессов водопользования применены методы математического моделирования и прогнозирования, основанные на вероятностных подходах, а также методы математического и генетического программирования, нейросетевого моделирования, машинного обучения и обработки большого объема данных. Разработана интеллектуальная информационно-советующая компьютерная система поддержки принятия решений по управлению системным водопользованием, сочетающая многокритериальное оптимизационное моделирование с методами искусственного интеллекта и современными геоинформационными технологиями. Она объединяет несколько ключевых подсистем: Управление водораспределением, Техническая эксплуатация, ГИС-интеграция, Прогнозирование, Цифровой двойник управления водохозяйственной организацией, Администрирование. Автоматизированное планирование распределения воды в условиях её дефицита осуществляли на основе экономико-математического моделирования. В процессе использовали многокритериальную функцию и генетический алгоритм оптимизации, что позволяло достичь максимальной эффективности. Для оптимизации процедур планирования мероприятий по технической эксплуатации применяли дискретную математическую модель, представляющую собой частный случай общей транспортной задачи математической оптимизации. Результаты апробирования АСУ на материалах службы эксплуатации мелиоративного водохозяйственного комплекса показали значительное повышение эффективности использования воды и надёжности сооружений оросительных систем. Это стало возможным благодаря развитию информационной и технологической поддержки управленческих решений водохозяйственных организаций. Так, эффективность планирования водораспределения в сложных метеорологических условиях, когда наблюдается дефицит воды, повышается на 10 % по сравнению с традиционным методом, который подразумевает сокращение подачи воды в зависимости от уровня водообеспеченности оросительной системы. Реализация многокритериального экономико-математического моделирования и искусственного интеллекта при выборе первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ снизила возможный ущерб на 10–15 % в сравнении с однокритериальными решениями, которые основываются на максимизации площади орошаемых земель, доходности водохозяйственной организации или сокращении потерь поливной воды.

Ключевые слова: системное водопользование, управление, моделирование, генетические алгоритмы, автоматизация

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова» (тема № FGUF–2022–0001). Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Рогачев Д. А. Повышение эффективности управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем: методология и технология. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2025;26(4):840–851. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851>

Поступила: 02.04.2025

Принята к публикации: 17.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Improving the efficiency of water use management of irrigation systems: methodology and technology

© 2025. Dmitry A. Rogachev✉

All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation
named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

The purpose of the study is to improve the management of systemic water use, ensuring an increase in the effectiveness of control actions, which is especially critical in conditions of limited natural resources and financing of operational measures. The research materials were publications, stock materials; information on the operation of inter-farm irrigation systems, technologies for their purpose and criteria for evaluating the effectiveness of management decisions; rules for water distribution and other materials necessary to achieve the purpose of the study. In the course of the research, mathematical modeling and forecasting methods based on probabilistic approaches, as well as methods of mathematical and genetic programming, neural network modeling, machine learning and big data processing were used to optimize technological processes of water use. An intelligent information and advisory computer decision support system for managing systemic water use has been developed, combining multi-criteria optimization modeling with artificial intelligence methods and modern geoinformation technologies. It combines several key subsystems: Water distribution management, Technical operation, GIS integration, Forecasting, Digital twin of water management organization, Administration. Automated planning of water distribution in conditions of water scarcity is carried out on the basis of economic and mathematical modeling. The process uses a multi-criteria function and a genetic optimization algorithm, which allows for maximum efficiency. A discrete mathematical model is used to optimize the planning procedures for technical operation, which is a special case of the general transport task of mathematical optimization. The results of testing automated control systems on the materials of the meliorative water management complex operation service showed a significant increase in water use efficiency and reliability of irrigation system structures. This became possible due to the development of information and technological support for management decisions of water management organizations. Thus, the efficiency of water distribution planning in difficult meteorological conditions, when there is a shortage of water, increases by 10 % compared to the traditional method, which involves reducing water supply depending on the level of water availability of the irrigation system. The implementation of multi-criteria economic and mathematical modeling and artificial intelligence in the selection of priority repair and restoration facilities reduced possible damage by 10–15 % compared to single-criteria solutions that are based on maximizing the area of irrigated land, profitability of a water management organization or reducing irrigation water losses.

Keywords: systemic water use, management, modeling, genetic algorithms, automation

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (theme No. FGUF–2022–0001).

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interest: the author declared no conflict of interest.

For citation: Rogachev D. A. Improving the efficiency of water use management of irrigation systems: methodology and technology. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):840–851. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851>

Received: 02.04.2025

Accepted for publication: 17.07.2025

Published online: 29.08.2025

В современном мире, где водные ресурсы становятся всё более ограниченными, решение проблем водопользования приобретает особую значимость. Эффективное использование водных ресурсов не только способствует сохранению окружающей среды, но и обеспечивает устойчивое развитие сельского хозяйства, промышленности и других отраслей экономики. Особенно остро проблема управления водопользованием встает в контексте межхозяйственных оросительных систем (ОС), которые играют важную роль в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельского хозяйства, представляющего одну из наиболее водоемких сфер производства.

Управление водопользованием межхозяйственных оросительных систем является сложным процессом, требующим учёта множества факторов [1]. В первую очередь к ним относятся:

- природно-климатические условия: климат, рельеф, гидрологические особенности региона, в котором расположена оросительная система;

- хозяйственные условия: тип сельскохозяйственных культур, выращиваемых на орошаемых землях, их водопотребление, а также экономические условия ведения сельского хозяйства;

- технические условия: состояние и эффективность оросительных систем, наличие и качество оборудования для управления водопользованием.

Проблемы водопользования, обусловленные природно-хозяйственными факторами, усугубляются в условиях дефицита ресурсов, из которых наиболее критичны дефицит поливной воды и недостаточное финансирование ремонтно-восстановительных работ. Для обеспечения должной эффективности использования

водных ресурсов с учетом интересов всех участников процесса водопользования необходима информационная поддержка принимаемых решений по межхозяйственному водораспределению и/или выбору первоочередных мероприятий технической эксплуатации, что успешно реализуется на основе оптимизационного моделирования.

Инновационные технологии, такие как искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение (МО) и цифровые двойники (ЦД), открыли новые возможности для совершенствования управления водопользованием в орошении [2, 3, 4]. В условиях современных вызовов и глобальных трендов автоматизированные системы управления технологическими процессами становятся ключевым инструментарием для снижения рисков при планировании и реализации водоподдачи [5, 6]. Этот подход доказал свою эффективность как на международном уровне, так и в отечественной практике. К сожалению, сейчас в службе эксплуатации мелиорации указанные инновационные подходы, как правило, не практикуются, в то время как цифровая трансформация управления технологическими процессами и производством признается неотъемлемым фактором успешности управляющих воздействий и конкурентоспособности организации [7, 8]. Таким образом, повышение эффективности водопользования является актуальным и имеет большое практическое значение.

В настоящей работе представлены результаты совершенствования методологии и цифровой трансформации технологий управления водопользованием на межхозяйственных оросительных системах в напряженных природно-хозяйственных условиях на основе оптимизационного моделирования и применения цифровых двойников менеджмента водохозяйственной организации в составе интеллектуальных автоматизированных систем.

Цель исследования – усовершенствовать управление системным водопользованием для повышения эффективности управляющих воздействий в условиях ограничения природных ресурсов и финансирования эксплуатационных мероприятий.

Научная новизна – разработка новых подходов к управлению системным водопользованием на основе методов много критерияльной оптимизации, нейросетевого моделирования и генетических алгоритмов для автоматизированного водораспределения в условиях дефицита водных и ресурсных ограничений,

не практикующихся в настоящее время в сфере мелиорации.

Материал и методы. Материалом служили итоги исследований специалистов Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, нормативно-методическая документация и данные водохозяйственных организаций Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Методы исследований включали: экспертные оценки; экономико-математическое, стохастическое моделирование и прогнозирование; математическое и генетическое программирование и оптимизацию; искусственный интеллект и нейросетевое моделирование.

Результаты и их обсуждение. Проблемы планирования, реализации, совершенствования и развития водопользования орошаемого земледелия изучаются в России достаточно давно, заметно активизируясь в периоды масштабного развития мелиорации. Действующие в настоящее время нормативно-методические документы управления государственными оросительными системами сформированы в 60-80-х гг. прошлого столетия и не отвечают требованиям трансформирующихся природно-хозяйственных условий страны, обусловленных изменением климата, наличием частной собственности на землю и тому подобными факторами.

Приоритетным мероприятием становления системного водопользования, отвечающего современным требованиям АПК, признается цифровая трансформация водопользования, интерес к которой уже реализуется в исследованиях [2, 9] и требует дальнейшего масштабного развития.

Выполненный анализ существующих подходов к управлению водопользованием мелиоративного водохозяйственного комплекса выявил следующие ключевые направления его совершенствования [10, 11]:

- Минимизация непроизводительных затрат водных ресурсов для обеспечения устойчивого водопользования и поддержания экологического баланса территории.
- Приоритетное использование современных технологий и техники, что способствует повышению эффективности орошения.
- Учет климатических изменений и их воздействия на водные ресурсы для разработки адаптивных стратегий управления водопользованием.
- Разработка системы мониторинга для контроля использования водных ресурсов,

оценки эффективности водоподдачи, оперативного выявления и устранения проблем.

- Внедрение системы управления рисками, минимизирующей ущерб, связанные с дефицитом воды или другими факторами, влияющими на водопользование.

- Учет экономических факторов, таких как стоимость воды и эффективность орошения при разработке методологии управления водопользованием.

- Создание интегрированных систем управления водопользованием, реализующих его различные аспекты: использование водных ресурсов, охрана окружающей среды, социально-экономическое развитие территории и т. п.

- Сотрудничество с заинтересованными сторонами: фермерами, органами власти, научными организациями и общественностью, способствующее эффективности управления водопользованием.

- Повышение осведомленности и обучение персонала новым методам и технологиям.

Реализация этих направлений с использованием структурных элементов цифровизации (автоматизация принятия решений и рутинных задач, интеграция данных, искусственный интеллект, интеллектуальные системы управления, мониторинг и анализ, обучение и развитие) позволит повысить эффективность использования водных ресурсов на орошении и обеспечить устойчивое развитие сельского хозяйства.

В настоящей работе выполнены следующие исследования по совершенствованию методологии и технологии управления водопользованием на межхозяйственных оросительных системах:

- сформированы критерии многофакторной оценки эффективности управленческих воздействий на процесс водопользования;

- определены правила оптимизации системного плана водораспределения в условиях дефицита водных ресурсов, поскольку традиционный подход сокращения плановой водоподдачи пропорционально изменению водозабора на систему не учитывает потери урожайности конкретных сельскохозяйственных культур для конкретных пользователей и не позволяет оптимизировать ущерб недополива в целом по системе;

- создано методическое обеспечение, регламентирующее процедуры корректировки плана водопользования на этапе реализации;

- разработаны модель оптимизации и технология распределения ограниченных финансовых ресурсов с использованием генетического алгоритма при планировании мероприятий технической эксплуатации, что обеспечит достоверность прогнозируемого результата и выбор наиболее эффективного варианта;

- создана модель цифрового двойника управления менеджментом водохозяйственной организации с учетом интеграции эндогенных и экзогенных потоков информации автоматизированной системы управления водопользованием. Применение современных технологий цифровой трансформации менеджмента водохозяйственных организаций способствует повышению эффективности и снижению затрат на эксплуатацию оросительных систем;

- адаптирована совокупность нейросетевых моделей для краткосрочного прогнозирования урожайности на основе глубоких нейронных сетей комбинированной архитектуры, включающих рекуррентные и сверточные слои. Разработка новых методов повышения эффективности управленческих воздействий на межхозяйственных оросительных системах может стать продуктивным направлением исследований, способствующим результативности водопользования;

- предложена концептуальная модель, созданы методическое обеспечение, информационно-аналитическая технология и прототип автоматизированной системы управления водопользованием, базирующиеся на рациональных решениях, интеллектуальном управлении технологическими процессами и производством. Это повысит качество управляющих воздействий, снизит нагрузку на управленцев и ускорит процесс принятия решений.

Структурно-функциональная схема совершенствования методологии управления водопользованием, иллюстрирующая функциональные блоки методологии, с перечнем структурных элементов, разработанных в ходе исследований, представлена на рисунке 1. Основные улучшения коснулись структурных элементов следующих функциональных блоков: «Планирование и организация», «Автоматизация и модернизация», а также «Мониторинг и оценка результатов деятельности сельскохозяйственной организации». Разработанные в составе исследований решения по алгоритмам и процедурам, моделям и автоматизированная система способствуют цифровой трансформации управления водопользованием.



Рис. 1. Структурно-функциональная схема совершенствования методологии управления водопользованием на межхозяйственных оросительных системах /

Fig. 1. Structural and functional scheme for improving the methodology of water use management at inter-farm irrigation systems

Базовые модели управления технологическими процессами водопользования на межхозяйственных оросительных системах представлены оптимизационными моделями распределения ограниченных водных ресурсов и оптимизации планирования мероприятий технической эксплуатации (табл.).

Экономико-математическая модель оптимизации водораспределения на межхозяйственных оросительных системах обеспечивает планирование водораспределения между потребителями с учетом принципов равноправности и непрерывности водоподачи, что особенно критично в напряженных метеорологических условиях.

Максимизируемая многокритериальная целевая функция, характеризующая успешность мероприятия, включает следующие критерии: выручка от продажи продукции растениеводства на орошении; площадь орошаемых земель; доход водохозяйственной организации. Балансировка частных критериев интегрального показателя может осуществляться с помощью весовых коэффициентов, вычисляемых специалистами методом экспертных оценок.

С учетом нелинейности функции цели поиск оптимального плана водоподачи выпол-

няется эволюционно-генетическим методом, не требующим вычисления производных. Использование модели повышает эффективность использования водных ресурсов при учете интересов всех участников процесса водопользования. Материалы, характеризующие постановку задачи, математическое описание модели и другие, представлены в работе [12].

Приоритетным методом управления техническим состоянием оросительных систем в работе принят метод многокритериальной оптимизации, приоритет которого установлен в результате анализа существующих подходов к выбору управляющих воздействий и собственных исследований автора. В качестве целевой функции используется показатель успешности плана ремонтно-восстановительных работ, который учитывает площадь орошаемых территорий, прогнозируемое снижение потерь воды при поливе и ожидаемый финансовый результат водохозяйственной организации. Такой подход обеспечивает комплексную оценку результатов по планированию мероприятий технической эксплуатации ОС и позволяет оптимально распределить лимитированные ресурсы, как правило, существенно ограниченные в сравнении с потребностью.

Таблица – Математические модели процессов системного водопользования / Table – Mathematical models of systemic water use processes

<i>Модель / Model</i>	<i>Свидетельство о регистрации / Certificate of registration</i>
1. Эффективное распределение ограниченных водных ресурсов в условиях дефицита с использованием эволюционно-генетических алгоритмов и многокритериальной оптимизации / Efficient allocation of limited water resources in conditions of scarcity using evolutionary genetic algorithms and multi-criteria optimization	RU 2024611825 ¹
2. Системное водораспределение в условиях дефицита водных ресурсов с учетом их стохастичности / Systemic water distribution in conditions of scarcity of water resources, taking into account their stochasticity	RU 2024689542 ²
3. Управление техническим состоянием ОС / Management of technical condition of irrigation systems	RU 2024667866 ³
4. «Цифровой двойник» управления водохозяйственной организацией / The "digital twin" of water organization management	RU 2012610120 ⁴
5. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур в задачах системного водопользования / Forecasting crop yields in the context of systemic water use	RU 2024624450 ⁵

Математическое описание модели оптимизации распределения ресурсов на ремонтно-восстановительные работы ОС представляет частный случай специализированной транспортной задачи. Реализация оптимизационного моделирования выполняется с использованием эволюционно-генетического программирования [12] – одного из методов искусственного интеллекта.

Новым решением по цифровой трансформации процесса управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем стала модель цифрового двойника менеджмента водохозяйственной организации, которая характеризует виртуальную копию процесса управления всеми аспектами деятельности организации, направленными на достижение её целей и задач (рис. 2).

Модель реализует процедуры, алгоритмы и задачи планирования, организации, мотивации и контроля всех ресурсов и процессов внутри организации. Обеспечивает принятие решений, координацию работы сотрудников, анализ результатов и постоянное улучшение работы организации. Этот инструмент предоставляет возможность анализировать и оптимизировать процессы управления водными ресурсами, а также прогнозировать возможные сценарии развития событий. Программный комплекс цифрового двойника водохозяйственной организации базируется на типовых программных продуктах 1С-Предприятие: 1С-ERP, 1С-Документооборот (с возможностями искусственного интеллекта); 1С-ЗУП (зарплата и управление персоналом)⁶.

¹Рогачев Д. А. Оптимизация распределения оросительной воды в условиях дефицита методом эволюционно-генетических вычислений с нелинейной многокритериальной целевой функцией: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611825 Российская Федерация. № 2023688940; заявл. 22.12.2023; опубл. 25.01.2024. Бюл. №2. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60780200>

²Рогачев Д. А. Обоснование структуры и оптимизация параметров оросительной системы в условиях сочетания орошаемого массива с богарным с учетом стохастичности: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689542 Российская Федерация. № 2024687754; заявл. 18.11.2024; опубл. 06.12.2024. Бюл. №12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76403510>

³Рогачев Д. А. Подсистема технической эксплуатации АСУ Водопользования оросительной системы с использованием экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667866 Российская Федерация. № 2024666541; заявл. 17.07.2024; опубл. 31.07.2024. Бюл. №8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69589401>

⁴Рогачев Д. А., Таранец А. В. Система автоматизации учёта и поддержки управленческих решений в сфере логистики грузоперевозок в среде 1С-Предприятие: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610120. № 2011618187; заявл. 02.11.2011. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55060938>

⁵Рогачев Д. А. Временные ряды данных для тренд-сезонного и нейросетевого прогнозирования урожайности зерновых культур с использованием многолетних гидрометеорологических данных в почвенно-климатических условиях Юга России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624450 Российская Федерация. № 2024623872; заявл. 12.09.2024; опубл. 14.10.2024. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73233658>

⁶Обзор системы «1С : Предприятие». [Электронный ресурс]. URL: <https://v8.1c.ru/tekhnologii/overview/> (дата обращения: 16.06.2024).

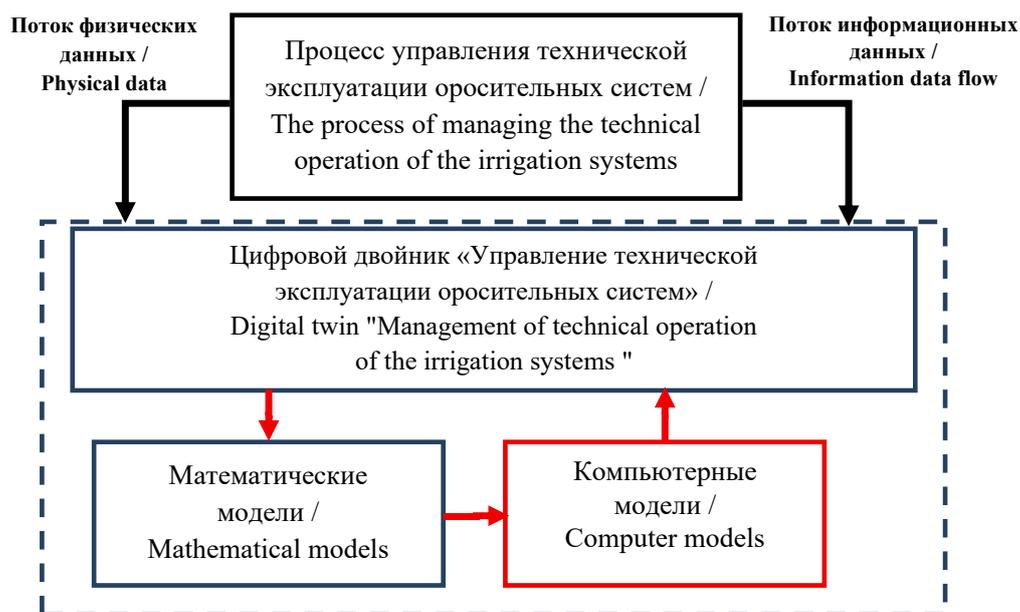


Рис. 2. Структурная схема цифрового двойника менеджмента водохозяйственной организации /
 Fig. 2. Block diagram of the digital twin of a water organization management

Данный программный комплекс обеспечивает автоматизацию оперативного и регламентного учета водохозяйственной организации и интегрирован с АСУ «Водопользование». В рамках подсистемы «Цифровой двойник» АСУ «Водопользование ОС» формируется управленческая отчетность, необходимая для эффективного управления водохозяйственной организацией.

Включение в состав АСУ «Водопользование ОС» модели «Цифрового двойника менеджмента водохозяйственной организации» позволяет оценить финансовое положение организации, выявить проблемы и принять обоснованные решения, оценить способность организации поддерживать свою деятельность на долгосрочной основе. Это важно для обеспечения устойчивого развития и сохранения водных ресурсов.

Предусмотрены методы: мониторинг, финансовая отчетность, сравнение, анализ, прогнозирование ключевых показателей. Разработка цифрового двойника управления организацией – актуальная задача для современных компаний, позволяющая оптимизировать бизнес-процессы, повысить эффективность управления,

обеспечить конкурентоспособность и укрепить безопасность. Внедрение цифровых технологий становится необходимым условием успешного развития экономики в современном мире.

Для результативной реализации указанных моделей в практике службы эксплуатации межхозяйственных ОС создана концептуальная модель и разработан прототип интеллектуальной автоматизированной системы управления технологическими и финансово-экономическими процессами водопользования.

В качестве технологической платформы реализации АСУ выбрана система 1С-Предприятие – приоритетный отечественный продукт для разработки систем управления. Это позволило сфокусировать усилия на функционале разрабатываемой системы, максимально используя возможности платформы по интеграции с широким спектром внешних инструментов.

Программно-технологические средства АСУ «Водопользование ОС»⁷, разработанные с учетом инновационных научно-методологических требований, гарантирующих развитие конкурентоспособного отечественного агропроизводства, обеспечивают:

⁷Рогачев Д. А. Подсистема «Водораспределение» автоматизированной системы управления «Водопользование оросительной системы» с использованием методов искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681320 Российская Федерация. № 2024669439: заявл. 20.08.2024; опублик. 09.09.2024. Бюл. №9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69599423>; Рогачев Д. А. Автоматизированная система управления водопользования оросительной системы с использованием экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618902 Российская Федерация. № 2025618902: заявл. 28.03.2025; опублик. 08.04.2025. Бюл. №4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80655258>

1. Управление и контроль ключевых процедур водопользования: мониторинг состояния инфраструктуры ОС и водоподачи; сбор и анализ данных; принятие обоснованных решений на основе полученной информации; автоматизация рутинных задач, включая сбор данных, обработку информации и генерацию отчетов.

2. Взаимодействие с пользователем, не требующее специального уровня подготовки, гибкие настройки.

3. Высокий уровень защиты данных: надежность и безопасность, регулярное резервное копирование и восстановление, эффективная защита от вирусов.

4. Кооперацию с внешними устройствами и платформами, бесшовный обмен информацией.

5. Адаптацию системы к увеличивающимся объемам данных и растущему числу пользователей. Расширение возможностей без простоев и сбоев в работе.

6. Высокую скорость обработки данных и выполнения задач. Оптимизацию использования компьютерных ресурсов.

7. Документацию пользователю: разработана подробная документация, описывающая функционал системы, её настройки и способы решения проблем.

8. Соответствие требованиям законодательства в области защиты данных, информационной безопасности и других аспектов.

9. Настройку системы под специфические требования и условия конкретного объекта управления.

10. Тестирование: предусмотрены механизмы для отслеживания и устранения проблем, выявленных при регулярном тестировании на наличие ошибок, уязвимостей и других.

В структуре АСУ «Водопользование ОС» сформированы следующие подсистемы: Водораспределение, Техническая эксплуатация, ГИС-интеграция, Прогнозирование. Цифровой двойник. Нормативно-справочная, Администрирование. Главное меню прикладного решения позволяет переходить к одной из подсистем, осуществлять поиск по прикладному решению и выполнять сервисные функции с конфигурацией (рис. 3).



Рис. 3. Главное меню АСУ «Водопользование ОС» /

Fig. 3. The main menu of the automated control system "Water use of irrigation systems"

Подсистема «Водораспределение» реализует комплексный подход к управлению процессами подачи воды. Основные функции включают расчеты тактического (годового, сезонного) и оперативного (декадного и суточного) планирования водораспределения с применением методов многокритериального моделирования и оптимизации решений на основе эволюционно-генетического программирования.

Планирование выполняется по заявкам сельскохозяйственных товаропроизводителей с учетом социально-экономических требований водопользования на орошении, природно-хозяйственных особенностей вегетационного периода и доступности водных ресурсов.

Функциональная структура подсистемы «Водораспределение» включает разделы «Справочники», «Документы» и «Отчеты».

В разделе «Справочники» содержатся подразделы: «Водовыделды», «Период планирования водоподачи», «Потребители», «Сельскохозяйственные культуры». Они обеспечивают сбор, хранение, обработку и подготовку данных для планирования водораспределения.

Формирование планов водораспределения происходит в разделе «Документы». Модуль «Планирование подачи воды» консолидирует заявки потребителей в разрезе водовыделов, анализирует возможность их исполнения и необходимость корректировки с учетом дефицита водообеспеченности и других ограничений, связанных с природно-хозяйственными условиями. При отсутствии дефицита водообеспеченности данные заявок переносятся в модуль «Водоподача план» для разработки итогового документа. В случае дефицита водообеспеченности используется модуль «Опти-

мизировать в условиях дефицита», который запускает подпрограмму оптимизации целевой функции планирования водораспределения.

Выходные документы планирования водораспределения формируются в разделе «Сводный план водоподачи» в табличной, графической и картографической формах, которые необходимы для подготовки оперативной и/или статистической отчетности. Настройка параметров выходных отчетов выполняется с использованием специализированных форм. Пример такой формы для настройки параметров оптимизации (ограничения, целевая функция, метод решения, параметры генетического алгоритма) представлен на рисунке 4.

Встроенная ГИС-подсистема позволяет гибко настраивать визуализацию параметров потребителей на уровне пользователей (рис. 5).

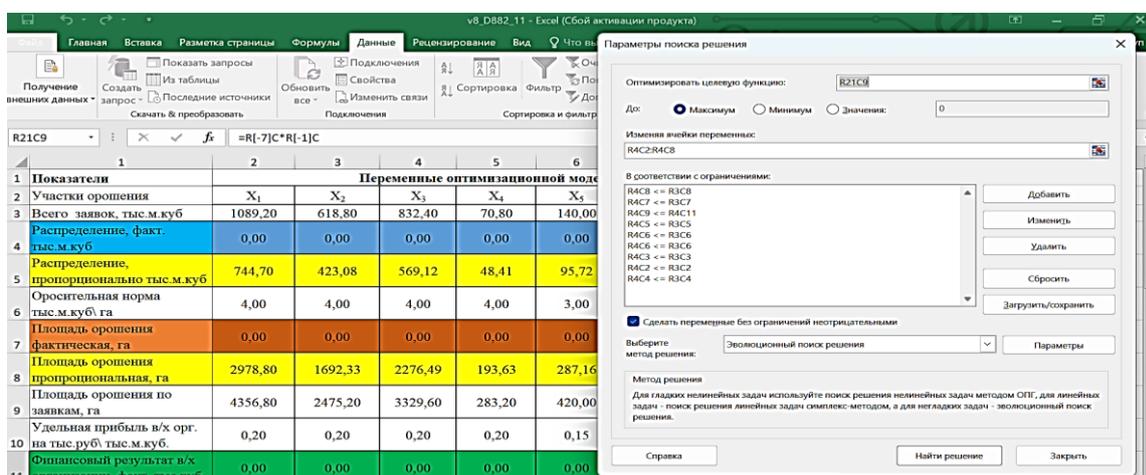


Рис. 4. Параметры запуска оптимизации многокритериальной целевой функции с использованием методов эволюционно-генетического программирования /

Fig. 4. Parameters for launching optimization of a multi-criteria objective function using methods of evolutionary genetic programming

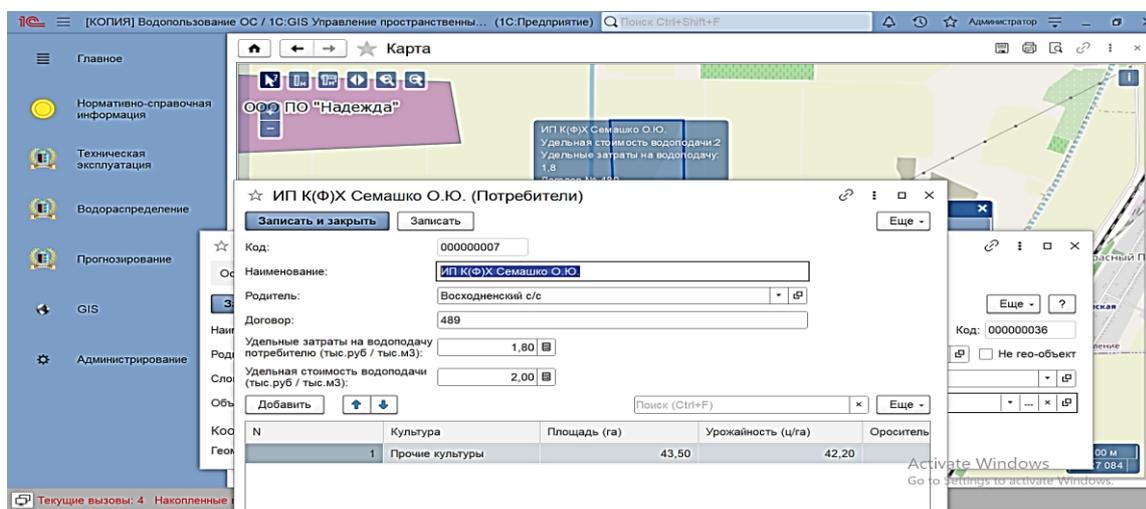


Рис. 5. Доступ к атрибутивным данным потребителей с использованием географической карты / Fig. 5. Access to consumer attribute data using a geographic map

Подсистема «Техническая эксплуатация» предназначена для управления состоянием инфраструктуры оросительных систем. Основные задачи включают:

- мониторинг технического состояния объектов (насосные станции, трубопроводы, каналы), включая учет геометрических параметров, балансовой стоимости, состояния износа и дат последнего ремонта;
- планирование ремонтно-восстановительных работ с оптимизацией распределения ограниченных ресурсов на основе многокритериальных моделей;
- картографическая визуализация объектов инфраструктуры, данных о потребителях и запланированных мероприятиях.

Подсистема позволяет вести учет иерархической структуры объектов технической эксплуатации (раздел «Объекты ОС») и хозяйств водопотребителей (раздел «Потребители»), устанавливать связи между этими элементами и привязывать объекты к географическим координатам для более наглядной визуализации.

ГИС-подсистема в составе АСУ «Водопользование» обеспечивает:

- визуализацию технико-экономических показателей в картографической форме: состояние объектов; потери воды; количество отказов оборудования; дебиторская задолженность потребителей; удельная стоимость подачи воды; прибыль водохозяйственной организации;
- анализ технического состояния объектов с помощью методов искусственного интеллекта;
- мониторинг несанкционированных подключений;
- оценку мелиоративного состояния участков;
- прогнозирование урожайности с использованием спутниковых снимков высокого разрешения на основе методов искусственного интеллекта.

В рамках подсистемы реализована возможность получения кадастровых данных о земельных участках и других данных электронных сервисов Росреестра.

Подсистема «Прогнозирование» предназначена для сбора и обработки данных об урожайности, во многом определяющих принятие решений при планировании сезонной водоподдачи. Данные используются для анализа и оценки эффективности водопользования, которые выполняются в преддверии вегетационного периода с учетом ожидаемой продуктивности растениеводства. Достоверность и доступность этих данных критически важна

для успешного управления водопользованием. В подсистеме применяются методы моделирования временных рядов и нейронные сети для прогнозирования урожайности на основе исторических данных. Интерфейс результатов обработки модуля.

В подсистеме «Цифровой двойник» осуществляется сбор и хранение данных о процессах водопользования, а также прогнозирование на их основе последствий принимаемых управленческих решений. Основные задачи подсистемы включают:

1. Имитация управленческих сценариев: оценка различных стратегий планирования водораспределения, мероприятий технической эксплуатации и т. п.

2. Формирование управленческой отчетности: автоматизация документооборота для оценки эффективности управления.

3. Интеграция данных: использование информации о состоянии производственных процессов и финансовых потоков для анализа производительности, успешности, конкурентоспособности.

Подсистема «Администрирование» выполняет функции авторизации, управления доступом и регламентные работы по обслуживанию СУБД.

Исследования показали эффективность системы «Водопользование ОС» для решения ключевой задачи эксплуатации – водораспределения, апробированного на материалах Городищенской оросительной системы Волгоградской области. Действенность управленческих решений по планированию водораспределения в сложных метеорологических условиях при дефиците поливной воды на основе оптимизации повышена на 10 % по сравнению с традиционным методом планирования, предполагающим пропорциональное сокращение водоподдачи в зависимости от ее дефицита.

Результаты оценки эффективности моно- и мультикритериальных подходов к оптимизации распределения воды на межхозяйственной оросительной системе показали преимущество последнего. Интегральный показатель эффективности водораспределения увеличился примерно на:

- 15 % в сравнении с вариантом оптимизации по критерию максимума площади орошения;
- 10 % по сравнению с вариантом оптимизации дохода водохозяйственной организации;
- 2 % при максимизации выручки от продажи продукции растениеводства.

При апробации подсистемы АСУ «Техническая эксплуатация» на Красногвардейской оросительной системе Республики Крым также отмечено повышение эффективности распределения ресурсов на мероприятия технической эксплуатации. Использование многокритериального экономико-математического моделирования и искусственного интеллекта для выбора первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ сократило возможный ущерб на 10–15 % в сравнении с однокритериальными решениями при максимизировании площади орошаемых земель, подкомандной объекту технической эксплуатации; доходности водохозяйственной организации или сокращения потерь поливной воды.

Заключение. Повышение эффективности управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем является актуальной задачей, которая имеет большое практическое значение. Водные ресурсы становятся всё более ограниченными, а эффективное использование воды необходимо для сохранения окружающей среды и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства, промышленности и других отраслей экономики. В ходе работы были проведены исследования, направленные на совершенствование методов и технологий управления водными ресурсами на межхозяйственных оросительных системах.

Определены критерии, позволяющие оценить эффективность управленческих решений

в области водопользования и разработаны многокритериальная модель и алгоритмы, оптимизирующие системное распределение воды в условиях дефицита водных ресурсов с использованием методов искусственного интеллекта.

Сформированы модель оптимизации и технология распределения ограниченных финансовых ресурсов на мероприятия технической эксплуатации с использованием генетического алгоритма.

Предложена модель цифрового двойника управления водохозяйственной организацией, учитывающая интеграцию внутренних и внешних информационных потоков.

Адаптирована совокупность нейросетевых моделей, основанных на глубоких нейронных сетях, для прогнозирования урожайности.

Предложена концептуальная модель, разработано методическое обеспечение и создан прототип автоматизированной системы управления водопользованием, ориентированной на рациональные решения и интеллектуальное управление. Внедрение этих разработок позволит повысить качество управленческих воздействий, снизить нагрузку на управленцев и ускорить процесс принятия решений. Таким образом, повышение эффективности управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем является важным шагом на пути к устойчивому развитию сельского хозяйства и сохранению водных ресурсов.

Список литературы

1. Кирейчева Л. В. Основные направления водосбережения в орошаемом земледелии России. Мелиорация и водное хозяйство. 2024;(4):79–82. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75084289> EDN LJTZCL
2. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В., Коржов И. В., Ольгаренко В. И. Принципы применения информационных технологий при организации и проведении планирования водопользования на оросительных системах. Мелиорация и гидротехника. 2024;14(3):100–115. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115> EDN: URAPHZ
3. Исаева С. Д., Дедова Э. Б., Матвеев А. В., Бубер А. Л., Щербаков А. О., Жезмери В. Б. и др. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления мелиоративно-водохозяйственным комплексом: к 100-летию Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова. М.: ВНИИ гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, 2024. 204 с. DOI: <https://doi.org/10.37738/VNIIGIM.2024.19.62.001> EDN: ZTXNHM
4. Sharma S., Pathak B. K., Kumar R. Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. Operations Research Forum. 2024;5:43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>
5. Salotagi S., Mallapur J. D. Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. Multimedia Tools and Applications. 2024;83:61139–61164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>
6. Alaimo L. S., Maggino F. Sustainable development goals indicators at territorial level: Conceptual and methodological issues – the Italian perspective. Social Indicators Research. 2020;147:383–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02162-4>
7. Щедрин В. Н., Бабичев А. Н., Домашенко Ю. Е., Косиченко Ю. М., Гостищев В. Д., Монастырский В. А. и др. Ресурсы агро-мелиоративных систем: научно-практическое издание. М.: Российский НИИ информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2021. 312 с.
8. Рогачев Д. А., Юрченко И. Ф., Рогачев А. Ф. Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта. Мелиорация и гидротехника. 2023;13(3):87–106. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106> EDN: YPTZVK

9. Волкова Е. А., Кудравец Д. А., Коржов В. И., Коржов И. В. Использование мобильных IT-приложений для решения задач водопользования на внутривозделываемой оросительной сети. Мелиорация и гидротехника. 2023;13(3):30–47. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-30-47> EDN: WCHPQE
10. Мелихова Е. В., Белоусов И. С. Реализация методов искусственного интеллекта и глубоких нейронных сетей в задачах сельскохозяйственных мелиораций. Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий: мат-лы Национальной научн.-практ. конф., Волгоград, 09 ноября 2022 года. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2023. Т. I. С. 302–307.
11. Щедрин В. Н., Васильев С. М., Слабунов В. В., Слабунова А. В., Завалин А. А. Подходы к формированию информационной системы «Цифровая мелиорация». Информационные технологии и вычислительные системы. 2020;(1):53–64. DOI: <https://doi.org/10.14357/20718632200106> EDN: FAWTUT
12. Рогачев Д. А. Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта. Природообустройство. 2024;(4):12–19. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19> EDN: TJFYZF

References

1. Kireycheva L. V. Main directions of water saving in irrigated agriculture in Russia. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2024;(4):79–82. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75084289>
2. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V., Korzhov I. V., Olgarenko V. I. Principles of using information technology in organizing and conducting water use planning in irrigation systems. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2024;14(3):100–115. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115>
3. Isaeva S. D., Dedova E. B., Matveev A. V., Buber A. L., Shcherbakov A. O., Zhezmeri V. B. et al. Intelligent decision support system for the management of the melioration and water management complex: dedicated to the 100th anniversary of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov. Moscow: *VNI gidrotekhniki i melioratsii im. A. N. Kostyakova*, 2024. 204 p. DOI: <https://doi.org/10.37738/VNIIGIM.2024.19.62.001>
4. Sharma S., Pathak B. K., Kumar R. Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. *Operations Research Forum*. 2024;5:43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>
5. Salotagi S., Mallapur J. D. Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2024;83:61139–61164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>
6. Alaimo L. S., Maggino F. Sustainable development goals indicators at territorial level: Conceptual and methodological issues – the Italian perspective. *Social Indicators Research*. 2020;147:383–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02162-4>
7. Shchedrin V. N., Babichev A. N., Domashenko Yu. E., Kosichenko Yu. M., Gostishchev V. D., Monastyrskiy V. A. et al. Resources of agro-reclamation systems: a scientific and practical publication. Moscow: *Rossiyskiy NII informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy po inzhenerno-tekhnicheskomu obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa*, 2021. 312 p.
8. Rogachev D. A., Yurchenko I. F., Rogachev A. F. System water distribution control based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023;13(3):87–106. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106>
9. Volkova E. A., Kudravets D. A., Korzhov V. I., Korzhov I. V. Using mobile it applications for solving water use problems in the on-farm irrigation network. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023;13(3):30–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-30-47>
10. Melikhova E. V., Belousov I. S. Implementation of artificial intelligence methods and deep neural networks in agricultural land reclamation tasks. Scientific justification of the strategy of digital development of the agro-industrial complex and rural areas: Proceedings of the National scientific and practical conference, Volgograd, November 09, 2022. Volgograd: *Volgogradskiy GAU*, 2023. Vol. I. pp. 302–307.
11. Shchedrin V. N., Vasilyev S. M., Slabunov V. V., Slabunova A. V., Zavalin A. A. Approaches to the information system formation "Digital land reclamation". *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* = Information Technologies and Computing Systems. 2020;(1):53–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14357/20718632200106>
12. Rogachev D.A. Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods. *Prirodoobustroystvo* = Prirodoobustroystvo. 2024;(4):12–19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

Сведения об авторе

✉ **Рогачев Дмитрий Алексеевич**, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова», ул. Большая Академическая, д. 44, корпус 2, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: contact@vniigim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4014-4770>, e-mail: Rogachev.soft@gmail.com

Information about the author

✉ **Dmitry A. Rogachev**, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Environmental Protection and Information Technologies, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Bolshaya Akademicheskaya str., 44, building 2, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: contact@vniigim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4014-4770>, e-mail: Rogachev.soft@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author