

Дмитрий Алексеевич Рогачев

Всероссийский НИИ гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, Москва, Россия

Rogachev.soft@gmail.com

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА МЕЖХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: МЕТОДОЛОГИЯ, РЕАЛИЗАЦИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ

Цель исследований – совершенствование методологии и создание технологии рационального распределения поливной воды с учетом потребностей всех участников процесса водопользования и природно-хозяйственных ограничений инфраструктуры межхозяйственных оросительных систем. Материалом исследований служили научные публикации и фондовые документы, действующие нормативно-правовые документы, практика службы эксплуатации. Исследования базировались на принципах системности, эффективности и адаптивности управления. В качестве базиса программно-аппаратных решений принята технологическая платформа «1С Предприятие 8», обеспечивающая работу с информацией, генерации сценариев и поддержку решений по управлению водопользованием в интеграции с автоматизированной учетно-управленческой системой организации. Анализ информационных потоков водохозяйственной организации выявил узкие места управления водораспределением в напряженных природно-хозяйственных условиях. Разработаны модели, алгоритмы и технологии решения приоритетных задач системного водораспределения при дефиците водообеспеченности, спроектировано специализированное программное обеспечение автоматизированной подсистемы управления водопользованием АСУ «Водораспределение». Реализовано решение задачи оптимизации водораспределения на основе многокритериальной нелинейной целевой функции методами искусственного интеллекта с использованием генетических алгоритмов. Цифровизация управления системным водопользованием является важным инструментарием повышения устойчивости оросительных систем. Тестирование подсистемы АСУ на материалах Городищенской оросительной системы показало, что в напряженных природных условиях эффективность водораспределения, планируемого по результатам многокритериального оптимизационного моделирования, повышается на 10 % по сравнению с традиционным подходом, предполагающим снижение водоподачи пользователям пропорционально дефициту водных ресурсов. Площадь орошения увеличилась на 15 %, доход водохозяйственной организации – на 10 %; производство валового объема продукции – на 2 %.

Ключевые слова: водораспределение, межхозяйственная оросительная система, цифровизация, математическое моделирование, искусственный интеллект, автоматизация

Для цитирования: Рогачев Д.А. Цифровая трансформация водораспределения на межхозяйственных оросительных системах: методология, реализация, результаты // Вестник КрасГАУ. 2025. № 7. С. 105–122. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-105-122.

Dmitry Alekseevich Rogachev

All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after. A.N. Kostyakov, Moscow, Russia

Rogachev.soft@gmail.com

DIGITAL WATER DISTRIBUTION TRANSFORMATION IN INTERFARM IRRIGATION SYSTEMS: METHODOLOGY, IMPLEMENTATION, RESULTS

The objective of the study is to improve the methodology and create a technology for rational distribution of irrigation water taking into account the needs of all participants in the water use process and natural and economic limitations of the infrastructure of inter-farm irrigation systems. The research material was scientific publications and archive documents, current regulatory documents, and the practice of the operation service. The research was based on the principles of systematicity, efficiency, and adaptability of management. The technological platform 1C Predpriyatie 8 was adopted as the basis for software and hardware solutions, ensuring work with information, scenario generation, and support for decisions on water use management in integration with the automated accounting and management system of the organization. Analysis of information flows of the water management organization revealed bottlenecks in water distribution management in stressful natural and economic conditions. Models, algorithms, and technologies for solving priority problems of systemic water distribution under water supply shortages were developed, specialized software for the automated water use management subsystem ACS Vodoraspredelenie was designed. The solution to the problem of water distribution optimization based on a multi-criteria non-linear objective function has been implemented using artificial intelligence methods with genetic algorithms. Digitalization of system water use management is an important tool for increasing the sustainability of irrigation systems. Testing the ACS subsystem on the materials of the Gorodishchenskaya irrigation system showed that in stressful natural conditions, the efficiency of water distribution planned based on the results of multi-criteria optimization modeling increases by 10 % compared to the traditional approach, which involves reducing water supply to users in proportion to the deficit of water resources. The irrigation area increased by 15 %, the income of the water management organization – by 10 %; gross production volume – by 2 %.

Keywords: water distribution, inter-farm irrigation system, digitalization, mathematical modeling, artificial intelligence, automation

For citation: Rogachev DA. Digital water distribution transformation in interfarm irrigation systems: methodology, implementation, results. *Bulletin of KSAU*. 2025;(7):105-122. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-105-122.

Введение. Рост населения, аридизация климата и повышенная антропогенная нагрузка выводят на первый план задачи рационального использования ограниченных водных ресурсов. В настоящее время часть стран на планете достигли предела в использовании доступных водных ресурсов. К началу 2025 г. ожидается дефицит пресной воды до 1,3...2 трлн м³/год по сравнению с оценками на конец XX в. порядка 200 млрд м³ [1]. Максимальное количество воды традиционно потребляет сельское хозяйство, в первую очередь на нужды орошаемого земледелия.

Согласно мнению экспертов мелиоративной сферы, ключевым аспектом повышения эффективности водопользования в орошаемом земледелии является внедрение цифровой трансформации процессов управления водораспределением [1–3]. Это направление включает интеграцию передовых методов экономико-математического моделирования, искусственного интеллекта и автоматизации процесса водо-

пользования, что позволяет оптимизировать распределение водных ресурсов, повысить эффективность водопользования и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду [4, 5].

В данной работе рассмотрены проектирование, разработка и апробация подсистемы «Водораспределение», созданной специалистами ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им А.Н. Костякова», в составе автоматизированной системы управления водопользованием государственной оросительной системы (АСУ «Водопользование ОС»). Создания подсистемы обеспечит справедливое и экономически эффективное распределение поливной воды с учетом потребностей пользователей и природно-хозяйственных ограничений инфраструктуры.

Цель исследования – совершенствование методологии и создание технологии рационального распределения поливной воды с учетом потребностей всех участников процесса водо-

пользования и природно-хозяйственных ограничений инфраструктуры межхозяйственных оросительных систем.

Задачи:

1. Выявить ключевые проблемы водораспределения в государственных оросительных системах, включая отсутствие эффективного инструментария информационной и технологической поддержки лиц, принимающих решения.

2. Разработать и применить инновационный подход к назначению управляющих воздействий водораспределения, включающий интеграцию искусственного интеллекта и экономико-математического моделирования с автоматизацией процессов принятия решений по распределению поливной воды.

3. Оптимизировать распределение лимитированных водных ресурсов между различными водопотребителями и элементами инфраструктуры оросительных систем с учетом противоречивых интересов участников процесса водопользования.

4. Реализовать возможность оптимизации водораспределения на основе многокритериальной нелинейной целевой функции методами искусственного интеллекта с использованием генетических алгоритмов в условиях дефицита водных ресурсов.

5. Создать компьютерную систему «Водораспределение ОС», которая реализует автоматизированную технологию планирования и водоподачи на межхозяйственных оросительных системах.

6. Автоматизировать документооборот, связанный с составлением планов водораспределения и водоподачи по заявкам сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Материалы и методы. В качестве материала исследований использованы научные статьи и архивные документы, посвященные вопросам водопользования на межхозяйственных оросительных системах. Кроме того, были изучены действующие нормативные и правовые акты (Федеральный закон от 10 января 1996 г. № 4-ФЗ «О мелиорации земель» (с изменениями и дополнениями), «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025)), касающиеся использования водных ресурсов, а также разработки информационно-аналитических систем, близких по своим функциям [3, 6–9]. Также был проанализи-

зирован опыт практической деятельности организаций, отвечающих за эксплуатацию государственных оросительных систем.

Исследования базировались на следующих принципах: системности, эффективности и экономичности, адаптивности управления. В ходе НИР были использованы подходы:

- интеграция информационных технологий и методов искусственного интеллекта;
- эколого-мелиоративная оптимизация;
- создание инновационного методического обеспечения;
- интеллектуальное управление водопользованием;
- автоматизация процедур водопользования.

По результатам анализа информационных потоков водохозяйственной организации выявлены узкие места в части управления водораспределением в напряженных природно-хозяйственных условиях и предложены способы их устранения. Разработаны модели и методы решения наиболее актуальных задач системного водораспределения и водоподачи, в первую очередь при дефиците водообеспеченности системы в целом, запроектировано специализированное программное обеспечение подсистемы «Водораспределение».

В качестве базиса реализации программно-аппаратных решений автоматизированной информационной системы управления водораспределением принята технологическая платформа «1С Предприятие 8», обеспечивающая функции ввода, хранения и обработки информации, генерации альтернативных сценариев и поддержки решений по управлению технологическими процессами водопользования в интеграции с автоматизированной учетно-управленческой системой эксплуатационной организации.

Ключевыми особенностями платформы являются: гибкость настройки бизнес-приложений, взаимодействие с СУБД, клиент-серверная архитектура, поддержка Интернета и мобильных технологий. Платформа обеспечивает отказоустойчивость, масштабируемость и интеграцию с отраслевыми решениями.

Преимущества «1С Предприятие 8» определяются наличием:

- встроенного языка для разработки алгоритмов;
- поддержки множественных СУБД (MS SQL Server, PostgreSQL, IBM DB2, Oracle Database);

- разнообразных операционных систем (Windows, Linux);
- клиентских и серверных приложений;
- встроенной ГИС-подсистемы для визуализации различных гибко настраиваемых на уровне пользователей данных;
- Web-расширения для интеграции с веб-сайтами;
- механизма обмена данными в офлайн-режиме;
- Web-сервиса;
- облачных сервисов для доступа через Интернет;
- интеграции с Яндекс.Картами и YMapsML.
- поддержки мобильных устройств (Android, iOS, Windows).

Использование платформы снизило трудозатраты на разработку и позволило сосредоточиться на прикладных задачах. Тестирование программного обеспечения АСУ проводилось на базе Городищенской оросительной системы в Волгоградской области.

Описание объекта автоматизации.

Объектом автоматизации является планирование сезонного/годового водораспределения на межхозяйственной оросительной системе и оперативной (декадной/суточной) водоподачи сельскохозяйственным товаропроизводителям. План водораспределения на оросительных системах определяет: сроки и нормы поливов, объемы водоподачи по каждому водовыделу отдельно взятого водопользователя и элемента ОС, а также объемы подаваемой воды, интегрированные по хозяйствам-водопользователям, элементам водопроводящей сети ОС и ОС, в целом согласованные с режимами работы головных и перегораживающих сооружений системы.

В системе водопользования межхозяйственных оросительных систем планирование водораспределения происходит согласно запросам потребителей на поливную воду. Объемы водозабора в систему рассчитываются путем сложения планируемых объемов подачи воды сельскохозяйственным производителям в узловых точках системы с учетом потерь водопроводящих сетей. Эти объемы согласуются с объемами возможного забора воды из источника орошения. Дисбаланс между указанными статьями водопользования становится ключевым ограничением для распределения воды между хозяйствами. Его устранение требует многократной корректировки и трудоемких расчетов, для вы-

полнения которых в настоящее время в службе эксплуатации мелиоративного водохозяйственного комплекса не существует нормативно лимитированных алгоритмов и правил. План считается сбалансированным, когда отклонение объема забираемой из источника орошения воды от планируемой подачи воды потребителям на систему не превышает 5 % в ту или иную сторону.

В отсутствии дефицита водозабора на межхозяйственной оросительной системе все внутрихозяйственные каналы получают воду согласно графику режима орошения. В случае маловодности источника орошения возможно введение водооборота на хозяйственных каналах, предусматривающего поочередность водоподачи, что может снизить водообеспеченность сельскохозяйственных культур. На ОС хозяйства/водопользователя при отсутствии дефицита водообеспеченности водооборот вводится только на внутрихозяйственных участковых распределителях и временных оросителях. Для каналов межхозяйственной ОС водооборот планируется при дефиците поливной воды и небольших значениях покомандных площадей орошения. Снижение объемов подаваемой каналом воды увеличивает потери на фильтрацию и затрудняет водораспределение.

Водораспределение на межхозяйственной оросительной системе осуществляется по одной из двух технологических схем управления: «по плану» или «по требованию». Схема управления водоподачей «по требованию» возможна:

- когда резервные объемы источника орошения или участка канала старшего порядка достаточны для сглаживания суточной неравномерности графика водопотребления. Резервные объемы всех участков канала выбраны с учетом возможности доставки компенсирующего расхода в соответствующее время, а расход источника орошения превышает суммарный максимальный расход водоподачи, выбранной с учетом спроса на системе и потерь воды из канала;

- общая резервная емкость канала достаточна для сглаживания суточной неравномерности водопотребления, а расход, забираемый из источника орошения, не меньше максимального среднесуточного расхода водопотребления из канала с учетом спроса водопотребителей и потерь воды по длине канала.

В случае, когда система орошения не получает достаточного количества воды, а пропускная способность канала и объем резервных ем-

костей недостаточны, применяется схема управления водоподачей «по плану».

Информация об основных параметрах управляемых объектов, уровнях и расходах воды в водоводах и водоемах, горизонте воды в водоисточнике, чрезвычайных ситуациях на сети и прочие сведения сосредоточены в диспетчерской службе. Диспетчеру предоставляются сведения о работоспособности насосного оборудования, данные приборов измерения. Он же выполняет дистанционное управление агрегатами и задвижками при автоматизированном управлении водораспределением.

В процессе оперативного управления водораспределением системный план подачи воды потребителям адаптируется к реальным условиям. Это необходимо, поскольку фактическая групповая водообеспеченность системы не всегда соответствует запланированным показателям. Традиционно корректировка водоподачи осуществляется путем изменения плановых объемов на водовыделах в хозяйства в соответствии с изменившейся водообеспеченностью системы. Однако этот метод уже не удовлетворяет современные требования эффективности водопользования, поэтому актуализируется проблема разработки инновационной методологии планирования водораспределения, реализующей действенные технологии управления в напряженных природно-хозяйственных условиях.

В современном мире, где технологии стремительно развиваются и проникают во все сферы жизни, цифровизация становится ключевым фактором успеха и конкурентоспособности предприятия, организации, сектора экономики и тому подобные структуры. Многовариантный анализ возможных подходов к планированию с учетом экономических, социальных и экологических ограничений, базирующихся на экономикоматематическом и нейросетевом моделировании, априори будет способствовать поиску оптимального управленческого решения в конкретных природно-хозяйственных условиях.

Серьезность проблемы водораспределения на межхозяйственных оросительных системах обостряется существенным износом и неудовлетворительным состоянием водопроводящих сетей и сооружений. Это приводит к потерям поливной воды и снижению уровня услуг, предоставляемых хозяйствам-водопользователям. Ремонтно-восстановительные работы и обновление инфраструктуры оросительной системы

представляют собой сложную задачу, требующую значительных финансовых ресурсов, технических знаний и согласованности между различными участниками процесса. Обеспечение надежности и снижение отказоустойчивости системы водораспределения связано также с необходимостью тщательного планирования и инвестирования в долгосрочные проекты по техническому обслуживанию, ремонту и замене устаревших сооружений и оборудования в условиях ограниченного финансирования.

Ограниченность средств, выделяемых на техническую эксплуатацию, повышает значимость возможных ошибок их распределения и необходимость разработки научно обоснованных инновационных технологий, которые будут способствовать исключению таких ситуаций.

В современных реалиях, когда потребность в мероприятиях технической эксплуатации ОС существенно превышает возможность их реализации в обозримом периоде, основополагающим фактором повышения эффективности водопользования становится управление водораспределением на основе оценки фактического и прогнозного уровня технического состояния и работоспособности водопроводящей сети ОС и сооружений на ней, обеспечивающих шанс оптимизации сети водораспределения.

Система показателей эффективности управления водопользованием определяет различные аспекты управленческой деятельности службы эксплуатации межхозяйственной оросительной системы: производственно-финансовую, социально-экономическую, экологическую; отношения с потребителем и в целом с обществом; обучение и развитие персонала.

Одним из эффективных способов улучшить качество управления предприятием в современных условиях является обеспечение специалистов информационно-технологической поддержкой в принятии управленческих решений. Это достигается с помощью автоматизированных технологий, которые используют инновационные методы и подходы для формирования необходимой информации на основе модели-двойника управления технологическими процессами водопользования.

Результаты и их обсуждение. По результатам анализа управления водопользованием государственных оросительных систем установлены ключевые проблемы водораспределения, в т. ч. обусловленные отсутствием эффективно-

го инструментария информационной и технологической поддержки лица, принимающего решение, что особенно критично в условиях дефицита водных ресурсов.

Разработан и применен инновационный подход назначения управляющих воздействий водораспределения, включающий интеграцию искусственного интеллекта и экономико-математического моделирования с автоматизацией процессов принятия решений по распределению воды в межхозяйственных оросительных системах. Такой подход является новым направлением в теории и практике эксплуатации мелиоративных систем.

Созданная в рамках НИР компьютерная система «Водораспределение ОС» (свидетельство о государственной регистрации ЭВМ № 2024681320) реализует автоматизированную технологию планирования и оптимизации водоподачи на межхозяйственных оросительных системах. Ее функциональные возможности включают широкий спектр задач:

1. Разработка тактических и оперативных планов водоподачи: система позволяет создавать годовые, сезонные, декадные и суточные планы распределения поливной воды, адаптируя их к изменяющимся условиям.

2. Оптимизация распределения лимитированных водных ресурсов: автоматизированная технология эффективно распределяет ограниченные водные ресурсы между различными водопотребителями и элементами инфраструктуры оросительных систем с учетом противоречивых интересов участников процесса водопользования.

3. Предоставление актуальной информации для управления: программный комплекс системы осуществляет оперативное взаимодействие между диспетчерами оросительных систем и производителями сельскохозяйственной продукции, обеспечивая поступление необходимой информации для принятия управленческих решений.

4. Оценка качества водораспределения и подготовка отчетов, что повышает прозрачность и эффективность управления водными ресурсами.

5. Автоматизация документооборота, связанного с составлением планов водораспределения и водоподачи по заявкам сельскохозяйственных товаропроизводителей.

6. Повышение производительности труда за счет автоматизации рутинных расчетов и процедур.

Управление системным водораспределением предусматривает схемы управления по требованию в условиях достаточной водообеспеченности и по плану при дефиците поливной воды. В условиях дефицита водных ресурсов реализована возможность оптимизации водораспределения на основе многокритериальной нелинейной целевой функции методами искусственного интеллекта с использованием генетических алгоритмов.

Итоговая целевая функция $Z_{\max}$ экономико-математической модели, максимизирующей финансовые результаты подачи воды, производства сельскохозяйственной продукции и суммарную площадь орошаемых земель с учетом их нормализации, имеет вид (1) при ограничениях (2).

$$Z_{\max} = (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (c_j - r_j) \cdot w_{ij}) / D_z + (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n z_i x_{ij} y_{ij}) / B_z + (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij}) / S_z \Rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq S_i; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{ij} = W_j;$$

$$\sum_{i=1}^n M_{ij} x_{ij} = W_j;$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{ij} = W,$$

где c_j – удельная стоимость водоподачи для j -водопользователя, руб/тыс. м³; r_j – удельная водоподача j водопользователю, руб/тыс. м³; w_{ij} – объем водоподачи на полив i культуры j водопользователю, тыс. м³; M_{ij} – оросительная норма i -й культуры j водопользователя, тыс. м³/га;

W – общий объем водоподачи на ОС, тыс. м³; S_i – площадь орошения i культуры; x_{ij} – площадь орошения i культуры j водопользователя, га; $j = 1, 2, \dots, m$ – индекс хозяйства водопользователя; z_i – закупочная цена i орошаемой культуры, руб/т; y_{ij} – урожайность i культуры j водо-

пользователя, т/га. D_z , B_z , S_z – соответственно доход от водоподачи эксплуатационной организацией ОС, выручка от продажи продукции растениеводства на орошении и площадь орошения при заявленной водоподаче; W_i , W_j – объем водоподачи на полив i культуры всех водопользователей, j водопользователю для полива всех культур, тыс. м³.

В качестве критериев приняты выручка от продажи продукции растениеводства на орошении, площадь орошаемых земель, доход водохозяйственной организации.

Функция модели, учитывающая множество критериев, позволяет эффективно распределять водные ресурсы, принимая во внимание интересы всех участников процесса водопользования. Алгоритмы эволюционного генетического программирования последовательно улучшают решения, имитируя эволюционные процессы, такие как отбор, скрещивание и вероятность мутации, и не требуют вычисления производных целевой функции. На рисунке 1 иллюстрируется алгоритм автоматизированного планирования системного водораспределения.

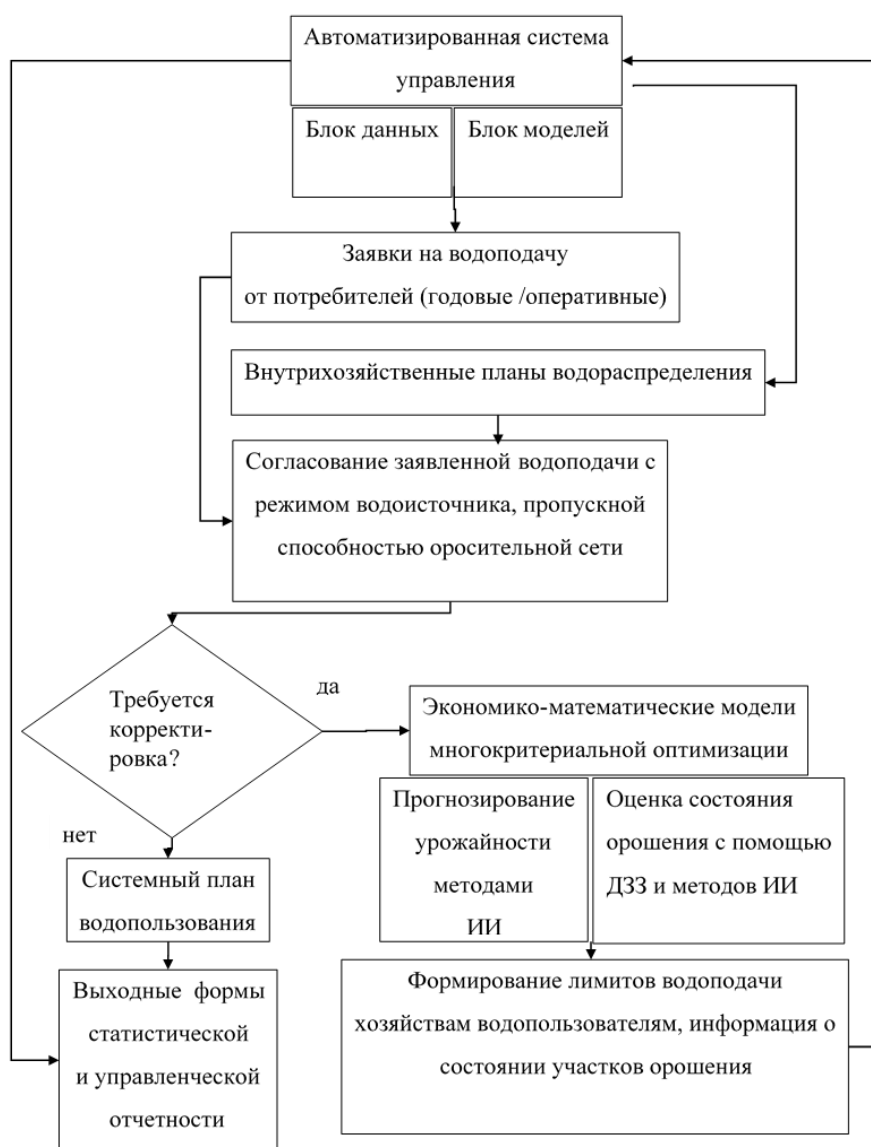


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного планирования системного водораспределения
Automated planning algorithm water distribution system

Разработанный алгоритм планирования системного водораспределения предлагает двухступенчатое моделирование и оптимизацию использования водных ресурсов в процессе сос-

тавления планов их распределения. На первом этапе определяется (по статистическим данным о водообеспеченности орошения в предыдущие годы) оптимальное соотношение площадей, ко-

торые будут орошаться и останутся без орошения в соответствии с прогнозируемыми условиями водоподдачи в предстоящем году. На втором этапе решается задача оптимизации распределения воды между хозяйствами и водопользователями с учетом технического состояния системы, планируемых севооборотов и текущей экономической ситуации.

Процесс автоматизированного планирования распределения воды начинается с предварительной оценки возможной водоподдачи сельскохозяйственным товаропроизводителям, которая обусловлена прогнозируемой водообеспеченностью оросительной системы в планируемый период; потребностью агропроизводства в водных ресурсах в зависимости от климатических условий и прогнозируемой водности года; техническим состоянием системы и намечаемыми мероприятиями ремонтно-восстановительных работ, пропускной способностью водопроводящей системы и др. На следующем этапе выполняется сбор заявок на поливную воду от водопользователей, их проверка на соответствие требованиям полноты и корректности информации (с возвращением адресату при необходимости) и загрузка в базу данных.

Системный план водопользования формируется программно-техническим комплексом АСУ автоматически и может анализироваться соответствующим структурным подразделением водохозяйственной организации на наличие дефицита водообеспеченности потребителям. Если дефицита воды нет, план водораспределения между хозяйствами водопользователями утверждается. Его реализация осуществляется после заключения договоров с водопользователями.

В противном случае, когда выявлено несоответствие заявленной потребности в поливной воде прогнозируемой водообеспеченности межхозяйственной оросительной системы, выполняется корректировка заявленной водоподдачи с использованием многокритериальной экономико-математической модели, критерии которой позволяют достичь рационального компромисса в области эколого-экономических требований к управлению водными ресурсами межхозяйственных оросительных систем при стабильном орошаемом земледелии.

Программное обеспечение системы «Водораспределение» отвечает следующим научно-методологическим требованиям к автоматизированным системам:

1. Функциональности:

- обеспечивается управление и контроль ключевых процедур, связанных с управлением водопользованием на межхозяйственных ОС;
- предусмотрена возможность отслеживать состояние инфраструктуры ОС, собирать и анализировать данные, а также принимать решения на основе полученной информации;
- автоматизируются стандартные задачи, связанные с управлением водопользованием, такие как сбор данных, обработка информации и создание отчетов.

2. Комфортности эксплуатации:

- взаимодействие с программой интуитивно понятно и просто в исполнении для пользователей с разным уровнем подготовки;
- реализована возможность настройки интерфейса под индивидуальные потребности пользователя.

3. Стабильности и защищенности:

- организовано резервное копирование и восстановление информации после сбоев;
- предусмотрена защита от внешних атак и атак вредоносных программ, включая вирусы.

4. Интеграции: способности взаимодействовать с внешними системами и устройствами.

5. Адаптируемости к изменениям объема данных и количества пользователей, к расширению функционала и добавлению новых модулей.

6. Результативности: реализованы высокая скорость обработки информации и выполнения задач, а также эффективное использование ресурсов компьютера для достижения максимальной производительности.

7. Соответствию требованиям законодательства в области защиты данных, информационной безопасности и других аспектов, связанных с функционированием АСУ.

8. Гибкости: программное обеспечение предоставляет возможность для настройки системы под специфические требования и условия конкретного объекта управления.

В составе подсистемы «Водораспределение» операции по планированию и реализации водораспределения объединены в ключевые блоки, характеризующие определенные этапы управления, каждый из которых имеет свой интерфейс воздействий. Структура блоков включает: подготовительный блок и блок планирования годовой/сезонной водоподдачи; блоки декадного и оперативного/суточного водораспределения; справочный блок.

Подготовительный этап планирования годового/сезонного водораспределения объединяет ключевые разделы: определение площади полива и норм орошения для различных сельскохозяйственных культур, расчет сезонного потребления воды, а также передачу предварительных данных лимитов водоподачи водопользователям.

Этап годового/сезонного планирования включает разделы: сбор, обобщение и анализ заявок на водоподачу, балансовые расчеты водоподачи с учетом гидрологических параметров источника орошения, передачу данных потребителям.

В процессе оперативного планирования (декада, неделя, пять дней, сутки) распределения

водных ресурсов решаются следующие задачи: сбор информации о потребностях в воде от различных пользователей; контроль за подачей воды; планирование транспортировки воды и ее сброса; поиск дополнительных источников водоснабжения; расчет водоподачи по элементам инфраструктуры оросительной системы и предоставление информации потребителям о декадных или суточных планах.

Интерфейс главного меню системы «Водораспределение» представлен объектами следующих типов: Справочники водораспределение, Документы водораспределение, Отчеты, Сервис (рис. 2).

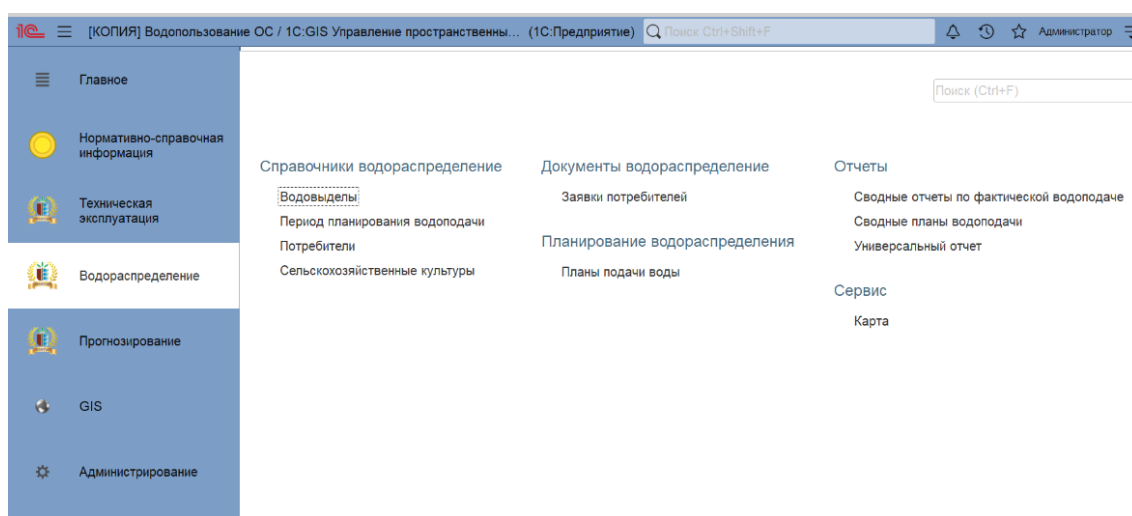


Рис. 2. Меню системы «Водораспределение»
Menu of the "Water Distribution" system

Объекты типа Справочники позволяют хранить статическую справочную информацию. Объекты Документы предназначены для хранения сведений, привязанных к некой дате и характеризующихся определенной периодичностью. Объекты типов Отчеты и Сервис служат

для формирования выходных форм и обработки данных с помощью алгоритмов и программ встроенного языка «1С-Предприятие». Структура объектов АСУ и их назначение в конфигурации «1С-Предприятие» характеризуются в таблице 1.

Таблица 1

Структура объектов системы «Водораспределение» в конфигурации «1С-Предприятие»
Structure of water distribution system facilities in the "1C-Enterprise" configuration

Объект	Назначение
1	2
Справочники	
Водовыделы	Характеризуют структуру водопроводящей сети, распределение орошаемых участков по водовыделам оросительной системы, позволяют определять лимиты подачи воды по элементам инфраструктуры и в целом по системе для установленных периодов планирования
Периоды планирования водоподачи	Хранит информацию о периодах планирования водоподачи: год, месяц, декада, день и т. п.

Окончание табл. 1

1	2
Потребители	Характеризует природно-хозяйственные условия хозяйств водопотребителей, перечень возделываемых культур; технико-экономические параметры орошения: площадь, структура орошаемых земель, оросительные нормы и пр.
Сельскохозяйственные культуры	Позволяет собирать и хранить сведения об оросительных нормах, урожайности на поливе и на богаре, стоимости и затратах на производство продукции и прочих показателях, связанных с растениеводством
Документы	
Заявки потребителей	Обеспечивает сбор, хранение, обработку и подготовку к использованию данных заявок на водоподачу от хозяйств-потребителей по периодам планирования системного водораспределения
Планы подачи воды	Осуществляет консолидацию заявок потребителей в разрезе водовыделов, выполняет анализ возможности обеспечения всех заявок или необходимости их корректировки с учетом дефицита водообеспеченности системы
Отчеты	
Сводные планы водоподачи	Обеспечивает формирование выходных форм сводных планов водоподачи с возможностью различных отборов и группировок
Сводные отчеты по фактической водоподаче	Формирует выходные формы фактической водоподачи в различных разрезах с возможностью отчетов и группировок
Сервис	
Карта	Позволяет визуализировать на географической карте атрибутивные данные, связанные с потребителями воды, получать доступ к атрибутивным данным

Эффективность и комфортность взаимодействия оператора с автоматизированной системой обеспечивается «дружественностью» интерфейса, разработка которого выполнена с учетом следующих основных аспектов:

1. Интуитивно понятный и удобный интерфейс, позволяющий операторам быстро освоить систему и эффективно выполнять свои задачи.

2. Наглядность и информативность: операторам предоставляется вся необходимая информация для принятия решений.

3. Визуализация данных, обеспечивающая представление графиков, диаграмм, карт. Это поможет операторам лучше понимать состояние водопользования на системе и принимать решения на основе визуальной информации.

4. Простота обучения, включающая наличие документации пользователя и примеров взаимодействия с системой, способствующих приобретению навыков работы с АСУ.

5. Гибкость, включающая изменение расположения элементов интерфейса, настройку цветов и шрифтов в зависимости от потребности оператора.

В качестве примера интерфейса взаимодействия ниже по тексту представлены формы для работы оператора со структурными объектами системы, разработанные с учетом вышеуказанных ключевых аспектов «дружественности» интерфейса (см. табл. 1).

На рисунках 3–6 демонстрируется интерфейс форм объектов типа Справочники. Форма объекта «Водовыделы», характеризующего инфраструктуру оросительной системы, представлена на рисунке 3.

Выбор периода планирования водораспределения: «Год», «Месяц», «Декада», «День» – выполняется с помощью форм объекта Справочники «Периоды планирования» (рис. 4).

На рисунках 5, 6 приведены интерфейсы форм справочной информации о водопотребителях и системе агропроизводства.

🏠

←

→

★ Водовыделы

Создать

Поиск (Ctrl+F)

Наименование

Водовыдел №1

Водовыдел №2

☆ Водовыдел №1 (Водовыделы)

🔗 ⋮ □ ×

Записать и закрыть

Записать

Еще ▾

Код:

Наименование:

Потребители

Лимиты подачи воды

Добавить

↑

↓

×

Еще ▾

N	Потребитель
1	ООО «Борис — Агро»
2	ИП К(Ф)Х Семашко О.Ю.
3	ИП К(Ф)Х Семашко Т.В.

Рис. 3. Интерфейс формы объекта Справочника «Водовыделы»
Interface of the object form Reference book "Water sources"

Рис. 4. Интерфейс формы Справочник «Периоды планирования» (период «Декада»)
 Interface of the Directory form "Planning periods" (the "Decade" Period)

[illegible]

Рис. 5. Интерфейс формы Справочники «Потребители»
Interface of the Directory form "Consumers"

Сельскохозяйственные культуры

Наименование Код

Озимая пшеница 000000001

Озимый ячмень 000000002

Кукуруза на зерно 000000003

Подсолнечник 000000004

Соя 000000005

Однолетние травы 000000006

Овощи 000000007

Баковые

Кукуруза на силос и з 000000008

Многолетние насажд

Многолетние насажд

Озимая рожь

Прочие культуры

Кукуруза на зерно (Сельскохозяйст...)

Записать и закрыть Записать

Код: 000000003

Наименование: Кукуруза на зерно

Закупочная стоимость (ц.тыс.руб): 0.00

Затраты на производство (ц.тыс.руб): 0.00

Урожайность (ц/га): 0.00

Оросительная норма (тыс.м3 / га): 0

Рис. 6. Интерфейс формы Справочника «Сельскохозяйственные культуры»
The interface of the Directory form "Crops"

Пример форм для работы со структурными объектами типа Документы представлены на рисунках 7–9. На рисунке 7 приведен интерфейс формы объекта Заявки потребителей.

Формы для сбора, организации и обработки информации об объекте «План подачи воды» изображены на рисунках 8, 9.

Для автоматизированного заполнения формы 7 используется процедура «Заполнить заявки по

водовыделу» (см. рис. 8) при этом автоматически синтезируются все заявки по каждому водовыделу. Осуществляется сравнение потребности в воде и лимит водообеспеченности, значение которого поступает автоматически из данных справочника «Водовыделы». В отсутствии дефицита данные заявок переносятся в реквизит «Водоподача план» табличной части документа (см. рис. 8) для формирования выходного документа.

Заявки потребителей 000000001 от 23.06.2024 22:39:11

Провести и закрыть Провести

Номер: 000000001

Дата: 23.06.2024 22:39:11

Потребитель: ООО «Берис — Агро»

Период планирования: 2024

Водовыдел: Водовыдел №1

Заполнить по справочным данным

Добавить

N	Культура	Площадь (га)	Водоподача (тыс м3)
1	Озимая рожь	272	1 089,20
2	Кукуруза на зерно	155	618,80
3	Подсолнечник	208	832,40
4	Соя	18	70,80

Рис. 7. Форма «Заявки потребителей»
The "Consumer Application" form

Планы подачи воды

Создать Печать

Дата	Номер	Период планирова...	Водовыдел	Лимит подачи воды (тыс м.куб)	Заявок на воду (тыс м.куб)
28.06.2024 14:06:03	000000001	2024	Водовыдел №1		
09.07.2024 10:28:13	000000002	2024	Водовыдел №1	2 000,00	2 751,20
26.07.2024 16:03:20	000000003	2024	Водовыдел №1	2 000,00	2 925,20
29.07.2024 14:58:22	000000004	2024	Водовыдел №1	2 000,00	2 925,20
29.07.2024 15:36:37	000000005	2024	Водовыдел №2	6 000,00	8 211,60

Рис. 8. Форма «План подачи воды» – форма списка
(с возможностью фильтрации и отбора по периоду планирования)
The "Water Supply Plan" form is a list form
(with the possibility of filtration and sampling by planning period)

N	Потребитель	Культура	Водоподача заявки (т...)	Водоподача план (т...)	Площадь оро...	Финанс
1	ООО "Крымагроцех"	Прочие культуры	1 400,00		350,00	
2	ООО "СП "Октябрьское"	Прочие культуры	620,00		155,00	
3	ООО «Крымская фруктовая ...	Прочие культуры	5 586,40		1 397,00	
4	ООО ПО "Надежда"	Прочие культуры	605,20		151,00	

Рис. 9. Интерфейс формы «План подачи воды»
Interface of the object shape "Water supply plan"

В случае дефицита водообеспеченности используется процедура «Оптимизировать в условиях дефицита». Данная процедура запускает подпрограмму оптимизации с использованием методов эволюционно-генетического программирования с помощью нелинейной многокритериальной целевой функции (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611825). Методическое обеспече-

ние данного решения подробно описано в работе [10]. Для настройки параметров оптимизации (ограничения, целевая функция, метод решения, параметры генетического алгоритма) используется специальная форма, представленная на рисунке 10.

Формат представления результатов оптимизации приведен на рисунке 11.

Показатели	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1 Участки орошения					
2 Всего заявок, тыс.м.куб	1089,20	618,80	832,40	70,80	140,00
3 Распределение, факт. тыс.м.куб	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 Распределение, пропорционально тыс.м.куб	744,70	423,08	569,12	48,41	95,72
5 Оросительная норма тыс.м.куб/га	4,00	4,00	4,00	4,00	3,00
6 Площадь орошения фактическая, га	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 Площадь орошения пропорциональная, га	2978,80	1692,33	2276,49	193,63	287,16
8 Площадь орошения по заявкам, га	4356,80	2475,20	3329,60	283,20	420,00
9 Удельная прибыль в/х орг. на тыс.руб/ тыс.м.куб	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15
10 Финансовый результат в/х организации, факт. тыс.руб	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Рис. 10. Параметры запуска оптимизации многокритериальной целевой функции с использованием методов эволюционно-генетического программирования
Parameters for launching optimization of a multi-criteria objective function using evolutionary genetic programming methods

Наименование показателя	ООО "Кузмиичи" - Договор №0108				ИП Круглова М.Е. Договор №0204				ИП Элькес Е.Д., Договор №1410				ИП Ложкин Я.Д., Договор №2606				Итого по ОС	
	Овощные	Зерновые	Кормовые		Овощные	Зерновые x5	Кормовые		Овощные	Зерновые	Кормовые		Овощные	Зерновые, x11	Кормовые		Оптимизированное значение	Предельное значение показателя
Водоподача заявка, тыс. м.куб	250	225	144		150	150	128		200	125	152		175	200	200		2099	
Водоподача факт, оптимизир., тыс. м. куб	249,9998797	224,11	16,69		149,09	150,00	14,78		199,99	114,51	17,64		175,00	163,97	24,14		1499,93246	1500
Площадь орошения заявка, га	50	90	36		30	60	32		40	50	38		35	80	50		591	
Площадь орошения оптимизир., га	50,00	89,65	4,17		29,82	60,00	3,70		40,00	45,80	4,41		35,00	65,59	6,03		434,17	
Площадь орошения пропорц., га	35,73	64,31	25,73		21,44	42,88	22,87		28,58	35,73	27,15		25,01	57,17	35,73		422,32	102,80%
Выручка, руб.	500 000	448 228	33 374		298 189	300 000	29 564		399 976	229 022	35 287		350 000	327 950	48 276			
Удельные затраты, руб. /тыс.м3	950	880,00	890,00		875,00	900,00	940,00		900,00	900,00	900,00		900,00	900,00	720,00			
Затраты, руб.	237 500	197 220	14 851		130 458	135 000	13 895		179 989	103 060	15 879		157 500	147 577	17 379			
Фин.результат оптимизированный, руб.	262 500	251 008	18 523		167 731	165 000	15 669		219 987	125 962	19 408		192 500	180 372	30 897		1 649 556	
Фин.результат при пропорциональном распределении ,руб	187 581	180 078	114 221		120 588	117 908	96 956		157 211	98 257	119 480		137 559	157 211	182 936		1 669 984	98,78%
Фин.результат при полном удвоительности заявки,руб	262 500	252 000	159 840		168 750	165 000	135 680		220 000	137 500	167 200		192 500	220 000	256 000		2 336 970	
Оросительная норма, тыс. м.куб/га	5	2,5	4		5	2,5	4		5	2,5	4		5	2,5	4			
Урожайность на поливе, т/га	36	5	25,5		36	5	25,5		36	5	25,5		36	5	25,5			
Базовая урожайность, т/га	20	2	15		20	2	15		20	2	15		20	2	15			
Козф.отзывчивости на полив	1,8	2,5	1,7		1,8	2,5	1,7		1,8	2,5	1,7		1,8	2,5	1,7			
Закупочная цена продукции, руб./т	51200	14756	7256		51200	14756	7256		51200	14756	7256		51200	14756	7256			
Валов. стоим. продукц., план, руб.	92 160 000	6 640 200	6 661 008		55 296 000	4 426 800	5 920 896		73 728 000	3 689 000	7 031 064		64 512 000	5 902 400	9 251 400		335 218 768	
Вал. стоим. продукц., оптимизированная, руб.	92 159 956	6 614 057	771 893		54 962 224	4 426 796	683 771		73 723 500	3 379 441	816 143		64 511 991	4 839 224	1 116 549		308 005 546	
Вал. стоим. продукц., пропорциональная, руб.	65 856 968	4 745 046	4 759 915		39 514 181	3 163 364	4 231 036		52 685 574	2 636 137	5 024 355		46 099 878	4 217 819	6 610 993		239 545 265	128,58%

Рис. 11. Результаты оптимизации распределения оросительной воды в условиях дефицита
Results of optimization of irrigation water distribution in conditions of scarcity

Апробация подсистемы «Водораспределение» выполнена на материалах службы эксплуатации Городищенской оросительной системы Волгоградской области и показала эффективность использования разработанных решений, как за счет цифровизации и повышения уровня поддержки управленческих решений, так и автоматизации рутинных процессов. Результативность планируемых управленческих реше-

ний по водораспределению в напряженных метеорологических условиях повышена на 10 % в сравнении с общепринятыми в практике отечественного водопользования подходами к планированию системного водопользования, которые предполагают пропорциональное сокращение подачи воды потребителям в зависимости от дефицита ресурсов (табл. 2).

Таблица 2

Эффективность методов планирования системного водораспределения
Effectiveness of planning methods for system water distribution

Метод	Критерий				Процент к традиционному варианту	Ограничения площади, га
	Доход водохозяйственной организации, тыс. руб.	Выручка от продажи продукции, тыс. руб.	Площадь полива, га	Функция цели		
Многокритериальное моделирование	1640,556	308005,6	434,17			591
Нормированное значение	0,706	0,919	0,735	2,359	110,1	
Сокращение водоподачи, пропорциональное дефициту водных ресурсов	1669,984	239545,5	422,32			591
Нормированное значение	0,714	0,714	0,7145	2,144		

В таблице 3 показаны результаты оценки эффективности моно- и мультикритериального подходов к оптимизации распределения воды на межхозяйственной оросительной системе. В последнем случае интегральный показатель эффективности водораспределения увеличился:

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

Таблица 3

Эффективность моно и мульти критериального способов системного водораспределения
The effectiveness of mono and multi-criteria methods of systemic water distribution

Критерий оптимизации		Площадь полива, га	Доход водохозяйственной организации, тыс. руб.	Выручка от продажи продукции растениеводства, тыс. руб.	Функция цели	Процент к критерию интегральной оптимизации
1		2	3	4	5	6
1	Интегральный	434,2	1 649,556	308 005,546		
	Нормированное значение	0,735	0,706	0,919	2,360	
2	Выручка от продажи продукции растениеводства	394,64	1 647,694	312 711,647	–	–
	Нормированное значение	0,668	0,705	0,933	2,306	97,7

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	1
3	Доход водохозяйственной организации	421,13	1 683,846	235 379,468	–	–
	Нормированное значение	0,713	0,721	0,702	2,136	90,2
4	Площадь полива	462,650	1 679,555	168 728,407		
	Нормированное значение	0,783	0,719	0,503	2,005	84,9

Таким образом, цифровая трансформация управления системным водопользованием становится важным инструментарием повышения устойчивости орошаемого земледелия. Применение моделирования, искусственного интеллекта, информационно-технологической поддержки назначения управляющих воздействий позволило оптимизировать использование ограниченных водных ресурсов, обеспечивая справедливое водораспределение между сельскохозяйственными товаропроизводителями в напряженных природно-хозяйственных условиях при рациональных затратах водохозяйственной организации.

Заключение. В результате исследований в составе автоматизированной системы управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем АСУ «Водопользование ОС» разработана подсистема управления водораспределением АСУ «Водораспределение», обеспечивающая справедливое и экономически эффективное распределение поливной воды с учетом потребностей пользователей и природно-хозяйственных ограничений инфраструктуры.

Подсистема «Водораспределение» реализует автоматизированную технологию планирования водоподдачи на межхозяйственных оросительных системах, позволяет разрабатывать тактические и оперативные планы водоподдачи и оптимизиро-

вать распределение лимитированных водных ресурсов с учетом интересов каждого из участников процесса водопользования. Разработанный инновационный подход назначения управляющих воздействий водораспределения сочетает искусственный интеллект, экономико-математическое моделирование и автоматизацию процессов принятия решений. Это новое направление в теории и практике эксплуатации мелиоративных систем.

Внедрение АСУ «Водораспределение» для управления системным водораспределением позволит оптимизировать использование воды на орошении, снизить негативное воздействие на окружающую среду и обеспечить более справедливое распределение водных ресурсов между различными потребителями и элементами инфраструктуры оросительных систем.

Программно-технологический комплекс «Водораспределение» обладает гибкостью, способствующей масштабированию и адаптации для применения в различных регионах и на различных типах оросительных систем.

Результаты исследования могут быть использованы в организациях, ответственных за эксплуатацию государственных оросительных систем, научными работниками и специалистами в области водопользования и мелиорации.

Список источников

1. Кирейчева Л.В. Основные направления водосбережения в орошаемом земледелии России // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 4. С. 79–82. EDN: LJTZCL.
2. Щедрин В.Н., Бабищев А.Н., Домашенко Ю.Е., и др. Ресурсы агрометеорологических систем: научно-практическое издание. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2021. 312 с. EDN: JXLZJB.
3. Ольгаренко В.И., Ольгаренко И.В., Коржов И.В., и др. Принципы применения информационных технологий при организации и проведении планирования водопользования на оросительных системах // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 3. С. 100–115. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115. EDN URAPHZ.
4. Рогачев Д.А., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф. Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта // Ме-

- лиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 87–106. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106. EDN: YPTZVK.
5. Мелихова Е.В., Белоусов И.С. Реализация методов искусственного интеллекта и глубоких нейронных сетей в задачах сельскохозяйственных мелиораций. В сб.: Национальная научно-практическая конференция «Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий», 9 ноября 2022 г. Том 1. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2023. С. 302–307. EDN: QXWTEK.
 6. Исаева С.Д., Дедова Э.Б., Матвеев А.В., 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.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2024. 204 с. DOI: 10.37738/VNIIGIM.2024.19.62.001. EDN: ZTXNHM.
 7. Sharma S., Pathak B.K., Kumar R. Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm // Oper. Res. Forum. 2024. Vol. 5. P. 43. DOI: 10.1007/s43069-024-00319-7.
 8. Salotagi S., Mallapur, J.D. Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications // Multimed Tools Appl. 2024. Vol. 83. P. 61139–61164. DOI: 10.1007/s11042-023-18064-0.
 9. Alaimo L.S., Maggino F. Sustainable development goals indicators at territorial level: Conceptual and methodological issues – the Italian perspective // Social Indicators Research. 2020. Vol. 147. P. 383–419.
 10. Кирейчева Л.В., Рогачев Д.А., Юрченко И.Ф., и др. Оптимизация распределения ограниченных водных ресурсов методами эволюционно-генетического программирования // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 2 (398). С. 233–238. DOI: 10.55186/25876740_2024_67_2_233. EDN: QABDGE.

References

1. Kireicheva LV. The main directions of water conservation in irrigated agriculture in Russia. *Land reclamation and water management*. 2024;4:79-82. (In Russ.). EDN: LJTZCL.
2. Shchedrin VN, Babichev AN, Domashenko YuE, et al. *Resources of agro-reclamation systems: Scientific and practical edition*. Moscow: Russian Scientific Research Institute of Information and Technical and Economic Research on engineering and technical support of the agro-industrial complex, 2021. 312 с. (In Russ.). EDN: LJTZCL.
3. Olgarenko VI, Olgarenko IV, Korzhov VI, et al. Principles of the use of information technologies in the organization and planning of water use in irrigation systems. *Land reclamation and hydraulic engineering*. 2024;14(3):100-115. (In Russ.). DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115. EDN: URAPHZ.
4. Rogachev DA, Yurchenko IF, Rogachev AF. Management of systemic water distribution based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods. *Land reclamation and hydraulic engineering*. 2023;13(3):87-106. (In Russ.). DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106. EDN: YPTZVK.
5. Melikhova EV, Belousov IS. Realizaciya metodov iskusstvennogo intellekta i glubokih nejronnyh setej v zadachah sel'skohozyajstvennyh melioracij. In: Nacional'naya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Nauchnoe obosnovanie strategii cifrovogo razvitiya APK i sel'skih territorij», 09. Nov 2022/ Volgograd, 2022. P. 302–307. (In Russ.). EDN: QXWTEK.
6. Isaeva SD, Dedova EB, Matveev AV, et al. An intelligent decision support system for managing the irrigation and water management complex: On the 100th anniversary of the A.N. Kostyakovs All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation. Moscow: Vserossiy-A.N. Kostyakov Moscow Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, 2024. (In Russ.). DOI: 10.37738/VNIIGIM.2024.19.62.001. EDN: ZTXNHM.

7. Sharma S., Pathak B. K., Kumar R. Multi-objective service composition optimization for smart agriculture using fuzzy-evolutionary algorithm. *Oper. Res. Forum.* 2024;5:43. DOI: 10.1007/s43069-024-00319-7.
8. Salotagi S, Mallapur JD. Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. *Multimedia Tools and Appl.* 2024;83:61139-61164. DOI: 10.1007/s11042-023-18064-0.
9. Alaimo LS, Maggino F. Sustainable development goals indicators at territorial level: Conceptual and methodological issues – the Italian perspective. *Social Indicators Research.* 2020;147:383-419.
10. Kireicheva LV, Rogachev DA, Yurchenko IF, et al. Optimization of the distribution of limited water resources by methods of evolutionary genetic programming. *International Agricultural Journal.* 2024; 2(398):233-238. (In Russ.). DOI: 10.55186/25876740_2024_67_2_233. EDN: QABDGE.

Статья принята к публикации 19.05.2025 / The article accepted for publication 19.05.2025.

Информация об авторах:

Дмитрий Алексеевич Рогачев, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий, кандидат технических наук

Information about the authors:

Dmitry Alekseevich Rogachev, Leading Researcher at the Department of Environmental and Information Technologies, Candidate of Technical Sciences

