

## Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

УДК 631.67:004.8

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-6-15>



### КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ ОРОШЕНИЯ

Л.В. Кирейчева<sup>1</sup>, Д.А. Рогачев<sup>2✉</sup>, М.Н. Лытов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова» (ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»); г. Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup> kireychevalw@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7114-2706

<sup>2</sup> rogachev.soft@gmail.com; ORCID: 0009-0003-4014-4770

<sup>3</sup> LytovMN@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-2743-9825

**Аннотация.** Цель исследований заключается в разработке концептуальных положений создания интеллектуальных гибких оросительных систем (ИГОС) нового поколения, обеспечивающих рациональное водопользование, адаптацию к изменяющимся природно-климатическим условиям и повышение устойчивости агроландшафтов. Методология исследований основана на применении методов системного анализа (для обоснования структуры ИГОС), экономико-математического моделирования (для формирования задачи многокритериальной оптимизации водораспределения), цифрового моделирования (при разработке цифровых двойников), а также методов искусственного интеллекта (для реализации адаптивного управления и прогнозирования мелиоративных процессов). Предложена структура интеллектуальной гибкой оросительной системы, включающая в себя три уровня: межхозяйственную, внутрихозяйственную и подсистему поля, – объединенные информационно-технологической платформой с цифровыми двойниками, обеспечивающей многокритериальную оптимизацию водораспределения, моделирование технической эксплуатации и прогнозирования мелиоративных процессов. Разработана и внедрена информационная система управления водопользованием (ИСУ «Водопользование ОС»), реализующая эволюционно-генетические алгоритмы оптимизации и адаптивное управление на межхозяйственных оросительных системах. Научная новизна исследований заключается в формировании структуры ИГОС как интегрированной многоуровневой системы, объединяющей процессы водораспределения, технической эксплуатации и управления мелиоративными режимами на основе цифровых двойников и методов искусственного интеллекта. Практическое применение системы на государственных оросительных системах Волгоградской области обеспечило экономию водных и финансовых ресурсов до 10% при сохранении производственных показателей. Результаты подтверждают эффективность перехода от традиционных инерционных оросительных систем к интеллектуальным высокотехнологичным структурам, основанным на цифровой трансформации и искусственном интеллекте. Сделан вывод о том, что ИГОС представляет собой новую форму организации мелиоративного производства, обеспечивающую системное управление природно-техническим комплексом и устойчивое развитие орошаемого земледелия в условиях дефицита водных ресурсов.

**Ключевые слова:** интеллектуальная гибкая оросительная система, цифровой двойник, многокритериальная оптимизация, управление водопользованием, искусственный интеллект, мелиоративные системы, автоматизация орошения, устойчивое земледелие, цифровая трансформация

**Формат цитирования:** Кирейчева Л.В., Рогачев Д.А., Лытов М.Н. Концептуальные положения создания высокотехнологичных систем орошения. Природообустройство. 2026;Т.19(2):6-15. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-6-15>

## CONCEPTUAL PRINCIPLES FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECHNOLOGY IRRIGATION SYSTEMS

L.V. Kireicheva<sup>1</sup>, D.A. Rogachev<sup>1</sup>✉, M.N. Lytov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Scientific Institution “A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation” (A.N. Kostyakov Federal State Budgetary Scientific Research Center VNIIGiM), Moscow, Russian Federation

<sup>1</sup>kireychevalw@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7114-2706

<sup>2</sup>rogachev.soft@gmail.com; ORCID: 0009-0003-4014-4770

<sup>3</sup>LytovMN@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-2743-9825

**Abstract.** The research aims to develop conceptual principles for creating a new generation of intelligent flexible irrigation systems that ensure rational water use, adaptation to changing climatic conditions, and increased agro-landscape sustainability. The study applies methods of systems analysis, economic-mathematical and digital modeling of water distribution and reclamation processes, principles of flexible production systems, and artificial intelligence technologies. A structure of the Intelligent Flexible Irrigation System (IFIS) is proposed, comprising inter-farm, on-farm, and field subsystems integrated through an IT platform with digital twins that enable multi-criteria optimization of water distribution, maintenance modeling, and prediction of reclamation processes. An information system for water use management (ISWU “Water Use OS”) has been developed and implemented, applying evolutionary-genetic optimization algorithms and adaptive real-time control. Its practical application in state irrigation systems of the Volgograd region achieved up to 10% savings in water and financial resources while maintaining productivity levels. The results confirm the effectiveness of transitioning from traditional inert irrigation systems to intelligent high-technology structures based on digital transformation and artificial intelligence. It is concluded that the IFIS represents a new organizational and technical form of reclamation production, ensuring systemic management of water use and sustainable development of irrigated agriculture under water scarcity conditions.

**Keywords:** intelligent flexible irrigation system, digital twin, multi-criteria optimization, water use management, artificial intelligence, reclamation systems, irrigation automation, sustainable agriculture, digital transformation

**Citation format:** Kireicheva L.V., Rogachev D.A., Lytov M.N. Conceptual principles for the development of high-technology irrigation systems. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):6-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-6-15>

**Введение.** Современный этап развития общества характеризуется созданием высокотехнологичных систем, обеспечивающих управление производственными процессами на базе информационных технологий с использованием искусственного интеллекта. Это относится и к оросительным системам, для которых необходимо применять системное управление потоками воды и минеральных веществ на мелиорируемом поле для обеспечения потребности сельскохозяйственных культур и получения урожайности, близкой к природно-ресурсному потенциалу данной климатической зоны. Цифровизация и автоматизация управления позволяют оперативно собирать и эффективно обрабатывать большие объемы данных, а также обеспечивать согласование необходимых воздействий между потребностями растений, показателями мелиоративного состояния земель и технологическими средствами, реализующими эти воздействия на оросительной системе [1-3]. При этом на практике наблюдается

противоречие между возрастающей вариабельностью природно-климатических условий, требованиями к ресурсосбережению и ограниченными возможностями существующих оросительных систем, характеризующихся высокой инерционностью управления и отсутствием инструментов адаптивного регулирования. Это обуславливает необходимость разработки принципиально новых подходов к организации и управлению оросительными системами [4, 5].

Действующие в настоящее время оросительные системы в большинстве случаев инерционны, что не позволяет своевременно реагировать на изменение метеорологических параметров, требований растений к мелиоративному режиму и подобным факторам и полноценно выполнять производственные функции. Кроме того, существующие системы, построенные более 30 лет назад, капиталоемкие и водозатратны и характеризуются высокой мелиоративной нагрузкой на агроландшафт, что зачастую приводит к деградации

почвенного покрова и прилегающей территории. В последнее время на оросительных системах по различным причинам (изменение структуры возделываемых культур, обновление технологий полива, переход на новые источники энергии и водоснабжения) возникает производственная необходимость замены отдельных элементов, что требует корректировки технологических параметров системы и ее реконструкции. Указанные ограничения свидетельствуют о необходимости перехода от традиционных инерционных оросительных систем к интеллектуальным системам нового типа, способным обеспечивать адаптивное управление водопользованием и мелиоративными режимами в условиях изменяющейся внешней среды.

В отличие от ранее выполненных исследований, посвященных отдельным аспектам управления водопользованием, моделирования мелиоративных процессов и цифровизации оросительных систем, в статье предложен интеграционный подход, предусматривающий объединение указанных решений в рамках единой интеллектуальной гибкой оросительной системы, обеспечивающей согласованное управление всеми уровнями оросительной инфраструктуры.

#### **Материалы и методы исследований.**

Основанием для создания высокоавтоматизированных оросительных систем нового типа являются разработанная ранее в ФНИЦ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» парадигма биосферного природопользования и принципы построения гибких производственных систем, адаптированные к условиям управления оросительными системами. Указанные принципы обеспечивают оперативную перенастройку системы при изменении вида и объема продукции, а также способов ее производства. Рассматривая орошение как технологический процесс, можно сформулировать основные тенденции его реализации в мировой практике: сочетание различных способов полива для создания оптимальных условий развития растений; специализация применительно к виду выращиваемых культур (зерновые, овощи, кормовые, технические и пр.); приоритет развития малообъемных способов орошения, обеспечивающих снижение инфильтрационных потерь и уменьшение площади дренажа; энерго- и ресурсосбережение за счет увеличения масштаба и видов применения возобновляемых источников энергии и нетрадиционных источников воды для орошения [1, 2, 6, 7].

Рассматриваемые в работе методологические положения включают в себя использование системного анализа при формировании

иерархической структуры оросительной системы, экономико-математического моделирования при постановке и решении задачи оптимизации водораспределения, а также цифрового моделирования при разработке цифровых двойников подсистем. Методы искусственного интеллекта применяются при реализации алгоритмов адаптивного управления и прогнозирования мелиоративных процессов.

Совокупность указанных факторов, наряду с автоматизацией управления и применением методов искусственного интеллекта (ИИ), позволит сформировать оросительные системы нового типа с изменяемыми функциональными модулями, обеспечивающими применение различных способов полива в пределах поля при существующих технических параметрах и использование этих систем для снижения климатических рисков. Указанный подход существенно расширяет диапазон управляемых параметров и сценариев функционирования оросительной системы и обеспечивает решение задач управления в зависимости от специфики производственного цикла. Способность таких систем собирать, анализировать и использовать информацию для выбора оптимальных режимов функционирования в зависимости от изменяющихся внешних и внутренних условий определяет их интеллектуальный характер.

Наличие изменяемых функциональных модулей, обеспечивающих адаптацию и развитие возможностей оросительных систем без перестройки базовой архитектуры, придает им свойства гибких производственных комплексов нового поколения. Следовательно, создание высокоавтоматизированных систем орошения с изменяемыми функциональными модулями следует рассматривать как формирование интеллектуальных гибких производственных систем.

Применение указанных методов позволило сформировать концептуальные и алгоритмические решения, положенные в основу построения интеллектуальной гибкой оросительной системы, включая структуру ее подсистем, модели водораспределения и элементы цифровых двойников, обеспечивающие адаптивное управление мелиоративными режимами.

**Результаты и их обсуждение.** Предлагаемая структура интеллектуальной гибкой оросительной системы (ИГОС) представляет собой результат интеграции ранее разработанных моделей и алгоритмов в единую функционально связанную систему управления, обеспечивающую согласованное функционирование всех уровней оросительной системы.

ИГОС включает в себя технологии искусственного интеллекта (ИИ) и обладает моделью внутренней среды (цифровой двойник), что позволяет действовать в условиях неопределенности информации, реализовать механизмы самообучения и адаптации путем генерации последовательности действий для поставленной цели, а также подстраивать функционирование под изменяющиеся условия окружающей среды для достижения поставленных целей [8-10]. Управление ИГОС должно быть основано на компьютерной системе и настроено в режиме реального времени, для чего необходима разработка цифрового двойника.

Интеллектуальные оросительные системы представляют собой следующий шаг к более устойчивому и эффективному сельскому хозяйству. Их внедрение позволит фермерам адаптироваться к современным вызовам, связанным с цифровой трансформацией сельского хозяйства, изменением климата и растущими потребностями в продовольствии, обеспечивая при этом более рациональное использование ресурсов. Исходя из вышеизложенного структура ИГОС должна включать в себя [9-11]:

- устройства для выполнения технологического процесса. В данном случае это комплекс взаимосвязанных гидротехнических сооружений оросительной системы, техника полива, инфраструктура;

- модульную архитектуру с различными способами полива, характерными для данной природно-климатической зоны;

- состав управляющих воздействий оросительной системы для комплексного регулирования средообразующих факторов как совокупность программных и аппаратных средств по получению, преобразованию, анализу, передаче данных и использованию их для управления оборудованием оросительной сети при реализации эксплуатационного режима орошения;

- алгоритмы описания информационных процессов, включающие в себя сбор информации о функционировании природно-технического комплекса оросительной системы, обработку поступивших данных с помощью моделей процессов, протекающих при функционировании оросительной системы;

- модели прогнозирования природных процессов и программные комплексы, позволяющие анализировать воздействие на природную среду и оптимизировать мелиоративные режимы;

- устройства и датчики, обеспечивающие получение информации о состоянии технологического процесса функционирования оросительной

сети и мелиоративного состояния агроэкосистемы на орошаемых землях, включающие в себя автоматизированный контроль качества полива;

- интеллектуальную систему управления оросительной системой – это ядро ИГОС, которое принимает обработанную информацию, вырабатывает управляющие воздействия на оборудование оросительной сети, а также получает обратные связи о результатах этих воздействий. Система управления должна иметь способность к обучению и адаптации, то есть способность генерировать последовательность действий для поставленной цели, а также подстраивать свое поведение под изменяющиеся условия для достижения поставленных целей.

Гибкая оросительная система представляет собой иерархическую структуру, состоящую из трех взаимосвязанных подсистем: межхозяйственной, обеспечивающей забор воды из водисточника и распределение по оросительной сети; внутрихозяйственной, предназначенной для подачи воды к поливной технике и осуществляющей полив сельскохозяйственных культур; и собственно орошаемое поле, на котором происходит регулирование мелиоративного режима (рис. 1).

Выбор и обоснование критериев оптимизации – сложная и неоднозначная задача. В качестве первоочередных критериев оптимизации водораспределения между хозяйствами/водопользователями предлагается рассматривать:

- Финансовый результат водохозяйственной организации (ВХО), который рассчитывается как разность между выручкой от подачи воды потребителю и затратами на ее подачу. Максимизация финансового результата ВХО стимулирует поддержание межхозяйственной системы в исправном состоянии, обеспечивающем снижение потерь воды в водопроводящей сети.

- Площадь орошения как показатель использования производственного потенциала орошения. Максимизация этого критерия повышает равноправность доступа потребителей к водным ресурсам и снижает социальное неравенство.

- Стоимость валовой продукции растениеводства, полученной хозяйствами-потребителями воды, служит в качестве критерия оценки эффективности водораспределения.

Экономико-математическая модель оптимизации водораспределения на межхозяйственной оросительной системе, в которой целевая функция формируется на основе трех указанных критериев, а их баланс достигается с помощью весовых коэффициентов, отражающих приоритетность целей, представлена в работе [12].

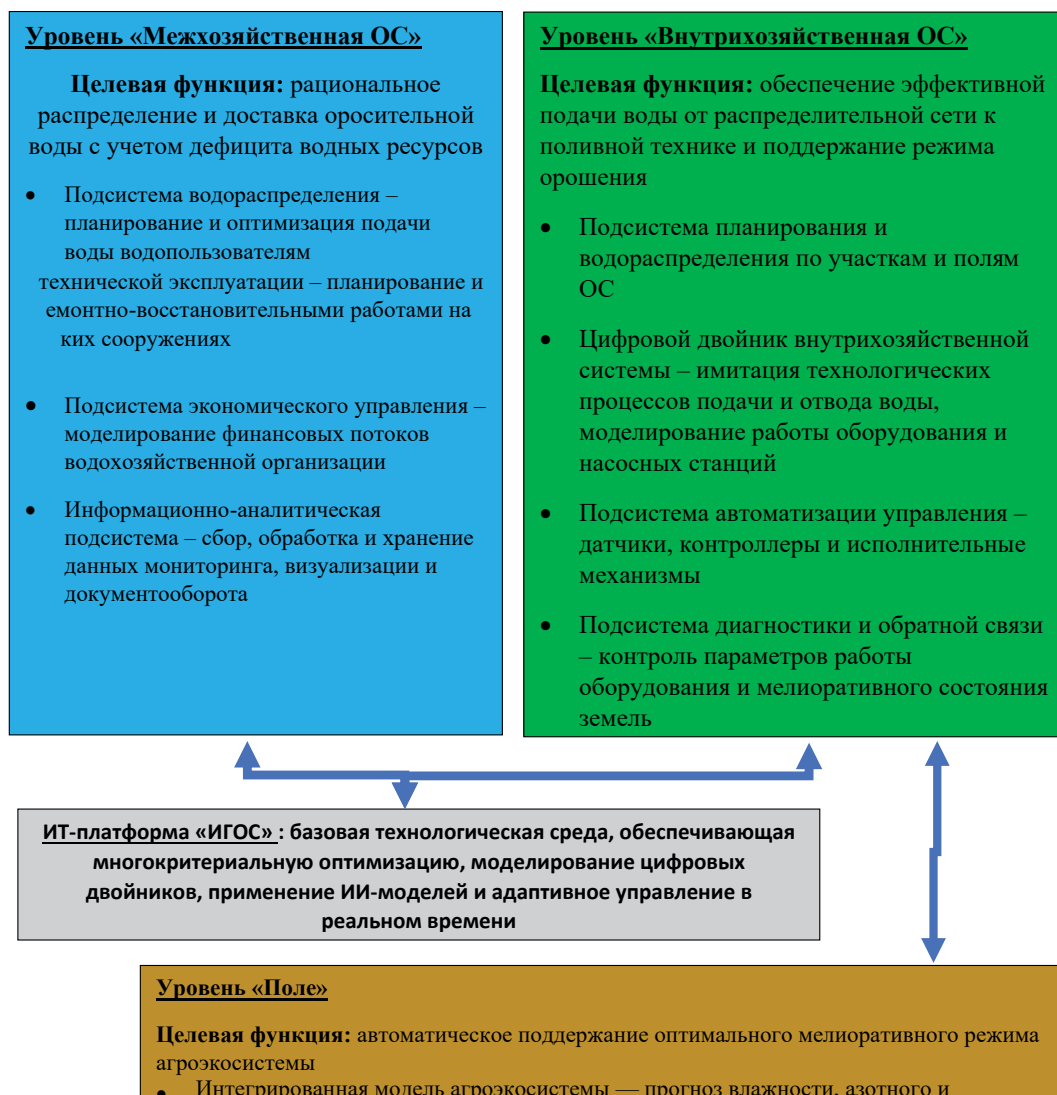


Рис. 1. Иерархическая схема взаимосвязей подсистем Интеллектуальной гибкой оросительной системы (ИГОС)

Fig. 1. Hierarchical scheme of interrelations of subsystems of the Intelligent Flexible Irrigation System (IGOS)

Разработана информационная система управления водопользованием (ИСУ «Водопользование ОС»), апробированная на государственных межхозяйственных оросительных системах, функционирующих в условиях дефицита оросительной воды и ограниченного финансирования ремонтно-восстановительных работ, что создает серьезные вызовы для рационального использования водных и инфраструктурных ресурсов. Структурно-функциональная схема ИСУ «Водопользование» представлена на рисунке 2.

Система использует методы многокритериального экономико-математического моделирования, искусственного интеллекта, модели-двойники управления организацией и обеспечивает решение следующих задач:

– планирование тактического и оперативного водораспределения на межхозяйственных

оросительных системах в напряженных метеорологических и хозяйственных условиях;

– назначение мероприятий ремонтно-восстановительных работ на гидротехнических сооружениях (ГТС), входящих в состав мелиоративной системы;

– управление финансово-экономическими процессами водохозяйственной организации для стабилизации рынка сельскохозяйственной продукции.

Ядро ИСУ «Водопользование ОС» включает в себя специализированные базы данных [14] и интеллектуальные программные модули «Оптимизация распределения оросительной воды», «Планирование технической эксплуатации», использующие эволюционно-генетические алгоритмы [15]. Программный комплекс обеспечивает как визуализацию атрибутивных и графических



Рис. 2. Структурно-функциональная схема ИСУ «Водопользование ОС» [13]

Fig. 2. Structural and functional diagram of the ISWU "Environmental Water Use" [13]

данных, так и автоматизацию документооборота по управлению процессами водопользования на государственных оросительных системах.

Апробация разработанной системы управления водопользованием выполнена на базе ФГБУ «Управление „Волгоградмелиоводхоз“ (Городищенский филиал) в 2023-2024 гг. в условиях дефицита оросительной воды и ограниченного финансирования. В результате внедрения обеспечено повышение эффективности распределения водных ресурсов за счет согласования заявок водопользователей с техническими возможностями системы, а также оптимизации планирования ремонтно-восстановительных мероприятий.

Совокупный эффект был выражен в снижении водных и финансовых затрат до 10% по сравнению с традиционными методами планирования при сохранении уровня сельскохозяйственного производства. Полученные результаты подтверждают эффективность и практическую реализуемость предложенного подхода. Управление внутрихозяйственной системой осуществляется с использованием цифрового двойника процесса управления (рис. 3).

Алгоритмы поливных модулей автоматизации представляют собой формализованное описание информационно-технологических процедур, включающих в себя сбор априорных данных

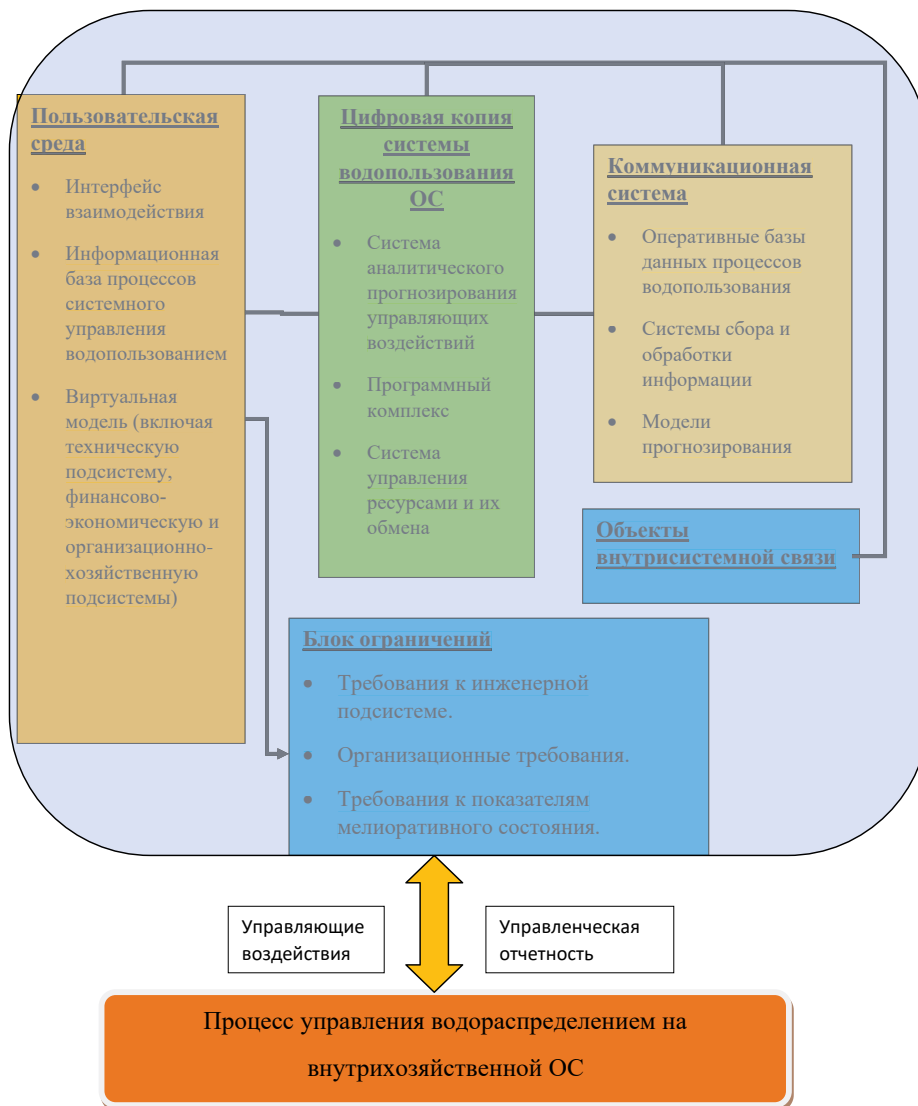


Рис. 3. Схема цифрового двойника внутривозьездной оросительной системы

Fig. 3. Diagram of the digital twin of the on-farm irrigation system

о состоянии и функционировании природно-технического комплекса оросительной системы и орошаемых земель, обработку данных моделирования процессов водопользования, формирование управляющих воздействий на оборудование оросительной сети и получение обратной связи о результатах их реализации.

При управлении мелиоративным режимом агроэкосистем на орошаемых землях предусматривается автоматическое поддержание заданных параметров или их изменение во времени на основе интегрированной модели с использованием нейросетевых методов. В этой связи разработана такая модель, предназначенная для оперативного регулирования водного и питательного режимов и обеспечивающая прогнозирование влажности, содержания органических веществ и азотных соединений в почвенном слое с целью поддержания оптимальных мелиоративных условий (рис. 4).

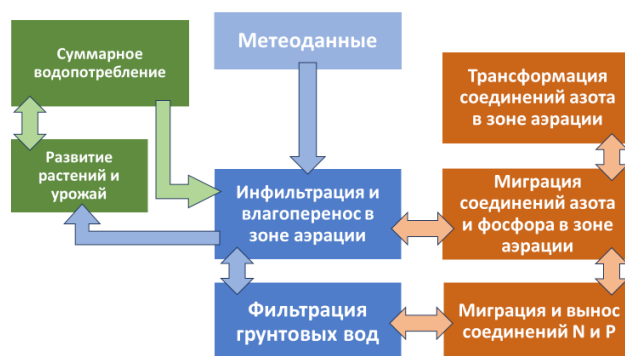


Рис. 4. Структурная схема программного комплекса моделирования мелиоративных процессов

Fig. 4. Structural diagram of the software package for modeling reclamation processes

Интегрированная модель агрогеосистемы представляет собой комплекс, объединяющий модель агрогеоценоза с моделью пространственной геофильтрации. Такая модель дает возможность

определять ключевые параметры мелиоративного режима с учетом экологических требований. Для описания перемещения влаги в зоне аэрации, развития растений и общего водопотребления были применены подходы, заимствованные из модели SWAP [8, 10]. Вместе с тем введен ряд упрощений: не учитывается воздействие стабильных почвенных фракций, игнорируется влияние трещиноватости горных пород, а также не моделируется уменьшение испаряемости с поверхности почвы. Для расчета миграции и трансформации соединений азота использованы принципы, реализованные в модели ANIMO [8]. При этом перенос и превращение фосфорных соединений не рассматриваются, а задача оценки поступления веществ в дренаж и поверхностный решается в модели пространственной геофильтрации.

Пространственная геофильтрация и массоперенос моделировались с помощью трехмерной модели nMtWolf, созданной Санкт-Петербургским отделением ИГЭ РАН. Модель разработана для решения трехмерных задач гидродинамики подземных вод и перемещения загрязнений в стационарных и нестационарных условиях – как для напорных, так и для безнапорных режимов фильтрации.

Сопряжение моделей влагопереноса и переноса азотных соединений с трехмерной моделью геофильтрации выполнено алгоритмическим методом, что дает возможность применять модульный принцип построения системы.

Для подготовки входных параметров разработана специализированная геоинформационная система (ГИС), которая обеспечивает задание пространственно-временных данных по аналоговому принципу и формирует единый массив исходной информации для интегрированной модели.

В блоке моделирования урожайности рост растения описывается с помощью индекса листовой поверхности, высоты растения и глубины корневой зоны как функций стадии развития, изменяющихся линейно во времени. Определение урожайности выполняется согласно методике [8, 10].

Миграционный модуль ориентирован на прогнозные задачи переноса загрязняющих веществ в масштабах бассейнов различных уровней. Он использует сетку, граничные условия и поля межблочных потоков, формируемые в фильтрационной части программы. Применение единой расчетной схемы для задач фильтрации и массопереноса уменьшает численные ошибки и повышает устойчивость решения, что особенно важно для нестационарных постановок. В расчетах учитываются продольная и поперечная дисперсии, молекулярная диффузия и массообмен между

зонами различной проницаемости, что позволяет получать корректные результаты на этапах краткого- и среднесрочного прогноза, когда миграционный процесс задействует еще не весь поровый объем водоносного горизонта.

Полученные результаты апробации и реализованные алгоритмы оптимизации водораспределения подтверждают возможность и эффективность применения заявленных методов в рамках разработанной системы управления.

### Выводы

Результаты исследований являются обоснованием необходимости перехода от традиционных инерционных оросительных систем к интеллектуальным гибким системам нового поколения, основанным на принципах цифровой трансформации, моделировании и применении технологий искусственного интеллекта. Интеллектуальная гибкая оросительная система (ИГОС) формирует новый тип организационно-технического устройства мелиоративного производства, способного адаптироваться к изменяющимся природно-климатическим и хозяйственным условиям, обеспечивая рациональное водопользование и повышение устойчивости агроландшафтов.

Реализация принципов модульности, иерархического управления и интеграции цифровых двойников на всех уровнях: от межхозяйственного до уровня поля – обеспечивает возможность многокритериальной оптимизации водораспределения, планирования технической эксплуатации и моделирования мелиоративных режимов в реальном времени.

Внедрение информационной системы управления водопользованием (ИСУ «Водопользование ОС») продемонстрировало практическую эффективность подхода: экономия водных и финансовых ресурсов составила около 10% по сравнению с традиционным планированием при сохранении стабильных показателей продуктивности.

Совокупность разработанных решений формирует научно-техническую основу для создания высокотехнологичных систем орошения нового типа, обеспечивающих переход от локального управления технологическими процессами к системному управлению мелиоративными объектами на базе интеллектуальных цифровых платформ. Это открывает перспективы повышения эффективности водопользования, экологической устойчивости агроэкосистем и результативности орошаемого земледелия в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и климатических изменений.

## Список использованных источников

1. Ольгаренко В.И. и др. Функции планирования водопользования на оросительных системах с использованием современных IT-технологий // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 1. С. 34-40 EDN: VYCUPN
2. Vallejo-Gómez D., Tarazona-Bermúdez G., López-Vicente M. et al. Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 342. DOI: 10.3390/agronomy13020342
3. Del-Coco M., Leo M., Carcagni P. Machine Learning for Smart Irrigation in Agriculture: How Far along Are We? // *Information*. 2024. Vol. 15, No. 6. Art. 306. DOI: 10.3390/info15060306
4. FAO, ITU. Digital Excellence in Agriculture: FAO-ITU Regional Contest on Good Practices Advancing Digital Agriculture in Europe and Central Asia. Rome: FAO, 2023. 168 p.
5. Сергеев Л.И., Сергеев Д.Л., Шендерюк-Жидков А.В. Стратегические направления цифровой трансформации агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов России // *Балтийский экономический журнал*, 2025.(3(51)) С. 53-73. <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2025-0-3-53-73>
6. Токарев К.Е. и др. Теория и технологии управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2020. № 4 (60). С. 433-448 EDN: VIMXRU
7. Preite L. & Vignali G. (2024). Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 223, 109126.
8. Ahsen R. et al. Harnessing digital twins for sustainable agricultural water management: a systematic review // *Applied Sciences*. 2025. Т. 15, № 8. С. 4228
9. Silva L. et al. The digital twin paradigm applied to soil quality assessment: a systematic literature review // *Sensors*. 2023. Т. 23, № 2. С. 1007
10. Pavón R.M. et al. Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks // *Expert Systems with Applications*. 2026. Т. 297. С. 129330
11. Kumar R., Singh A. Adaptive Irrigation Scheduling Using AI Techniques under Water Scarcity // *Agricultural Systems*. 2022. Vol. 198. Art. 103386
12. Кирейчева Л.В., Рогачев Д.А., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф. Оптимизация распределения ограниченных водных ресурсов методами эволюционно-генетического программирования // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2024. № 2. С. 233-238. EDN: QABDGE
13. Рогачев Д.А., Кирейчева Л.В., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф. Технология управления системным водопользованием с применением методов искусственного интеллекта и моделей-двойников организации // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2024. Т. 67, № 4 (400). С. 404-410. DOI: 10.55186/25876740\_2024\_67\_4\_404
14. Параметры для оптимизации распределения оросительной воды в условиях дефицита водных ресурсов с использованием генетического алгоритма: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624124 Российская Федерация: заявл. 15.11.2023; опублик. 22.11.2023 / Д.А. Рогачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»
15. 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:

## References

1. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Korzhov I.V. Functions of planning water use in irrigation systems using modern IT technologies // *Melioration and water management*. 2025. No. 1. P. 34-40. EDN: VYCUPN
2. Vallejo-Gómez D., Tarazona-Bermúdez G., López-Vicente M., et al. Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 342. DOI: 10.3390/agronomy13020342.
3. Del-Coco M., Leo M., Carcagni P. Machine Learning for Smart Irrigation in Agriculture: How Far along Are We? // *Information*. 2024. Vol. 15, No. 6. Art. 306. DOI: 10.3390/info15060306
4. FAO, ITU. Digital Excellence in Agriculture: FAO-ITU Regional Contest on Good Practices Advancing Digital Agriculture in Europe and Central Asia. Rome: FAO, 2023. 168 p.
5. Sergeev L.I., Sergeev D.L., Shenderyuk-Zhidkov A.V. Strategic directions of digital transformation of the agro-industrial and fisheries complexes of Russia // *Bulletin of the Volga State Technological University // Baltic Economic Journal*, 2025.(3(51)):53-73. <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2025-0-3-53-73>
6. Tokarev K.E. and others. Theory and technologies of crop irrigation management based on information technologies for decision support and mathematical modeling // *Izvestia of the Nizhnevolsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education*. 2020. No. 4 (60). P. 433-448. EDN: VIMXRU
7. Preite L., & Vignali G. (2024). Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 223, 109126.
8. Ahsen R. et al. Harnessing digital twins for sustainable agricultural water management: a systematic review // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 8. p. 4228.
9. Silva L. et al. The digital twin paradigm applied to soil quality assessment: a systematic literature review // *Sensors*. 2023. Vol. 23. no. 2. pp. 1007. 5. Pavón R.M. et al. Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks // *Expert Systems with Applications*. 2026. Vol. 297. P. 129330.
10. Pavón R.M. et al. Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks // *Expert Systems with Applications*. – 2026. – V. 297. – P. 129330.
11. Kumar R., Singh A. Adaptive Irrigation Scheduling Using AI Techniques under Water Scarcity // *Agricultural Systems*. 2022. Vol. 198. Art. 103386.
12. Kireicheva L.V., Rogachev D.A., Yurchenko I.F., Rogachev A.F. Optimization of the distribution of limited water resources by methods of evolutionary genetic programming // *International Agricultural Journal*. 2024. no. 2. P. 233-238. EDN: QABDGE
13. Rogachev D.A., Kireicheva L.V., Yurchenko I.F., Rogachev A.F. Technology of management of systemic water use using artificial intelligence methods and organization twin models // *International Agricultural Journal*. 2024. Vol. 67, No. 4(400). P. 404-410. DOI: 10.55186/25876740\_2024\_67\_4\_404.
14. Certificate of state registration of the database No. 2023624124 Russian Federation. Parameters for optimizing the distribution of irrigation water in conditions of water scarcity using a genetic algorithm: No. 2023624014: application no. 11/15/2023; published 11/22/2023 / D.A. Rogachev; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydrotechnics and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov".
15. Certificate of state registration of the computer program No. 2024611825 Russian Federation. "Optimization of irrigation water distribution in conditions of scarcity by the method of evolutionary genetic calculations with a nonlinear multi-criteria objective function": No. 2023688940: application 22.12.2023:

заявл. 22.12.2023; опублик. 25.01.2024 / Д.А. Рогачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»

published 25.01.2024 / D.A. Rogachev; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation"

#### Информация об авторах

**Людмила Владимировна Кирейчева**, д-р техн. наук, профессор, руководитель научного направления Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова; ORCID: 0000-0002-7114-2706; kireychevalw@mail.ru

**Дмитрий Алексеевич Рогачев**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий; ORCID: 0009-0003-4014-4770; rogachev.soft@gmail.com

**Михаил Николаевич Лытов**, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник ВНИИОЗ – филиала ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; ORCID: 0000-0003-2743-9825; LytovMN@yandex.ru

#### Information about the authors

**Lyudmila V. Kireicheva**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the scientific department of the Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova; ORCID: 0000-0002-7114-2706; kireychevalw@mail.ru

**Dmitry A. Rogachev**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Department of Environmental Protection and Information Technology; ORCID: 0009-0003-4014-4770, rogachev.soft@gmail.com

**Mikhail N. Lytov**, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher at VNIIOZ – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution FNTS VNIIGiM named after A.N. Kostyakov, ORCID: 0000-0003-2743-9825, LytovMN@yandex.ru

#### Вклад авторов

Л.В. Кирейчева – разработка концептуального замысла, проверка логики изложения

Д.А. Рогачев – разработка структуры статьи, редактировании текста и научной корректировке рукописи.

М.Н. Лытов – оформление графических материалов и подготовка рукописи к публикации.

#### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict

Поступила в редакцию / Received 28.10.2025

Поступила после рецензирования / Received 19.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 21.03.2026

#### Author Contribution

L.V. Kireicheva – development of a conceptual idea, verification of the logic of presentation

D.A. Rogachev – development of the article structure, text editing and scientific correction of the manuscript.

M.N. Lytov – design of graphic materials and preparation of the manuscript for publication.