УДК 626; 841.004 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-26-42*

Оригинальная статья/Original paper

Обоснование стратегий модернизации оросительных систем на основе сценарного моделирования

В. Д. Гостищев, Т. С. Пономаренко, А. Н. Рыжаков, А. В. Бреева

ann22hp@mail.ru

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Актуальность статьи обусловлена ростом климатической неопределенности и критическим износом оросительной инфраструктуры (до 60–70 %), что делает неэффективным планирование на основе усредненных показателей. Переход к проактивным методам управления, в частности к сценарному моделированию, позволяет заблаговременно оценить уязвимости системы, определить приоритеты модернизации и обеспечить устойчивость водопользования в условиях водного дефицита. **Методы.** Предложена классификация причин отклонений фактических объемов водопотребления от плановых показателей, разделенных на технические (износ инфраструктуры, неисправность оросительной техники, недостаток автоматизации, механизации и гидрометрии), управленческие, а также объективные внешние причины (изменение гидрометеорологических условий). Для каждого фактора разработаны типовые сценарии оптимизации с количественной оценкой ожидаемого эффекта. **Результаты.** Установлено, что реализация сценариев оптимизации позволяет снизить потери воды на 10–50 %, повысить коэффициент полезного действия системы до 0,80–0,85, сократить дефицит водоподачи на концевых участках на 30–50 %. Введена система ранжирования участков оросительной сети по критериям величины и продолжительности дефицита воды, что позволяет формировать приоритетные дорожные карты мероприятий. Предложен стандартизированный восьмиэтапный цикл оптимизации: от диагностики и калибровки гидродинамической модели до мониторинга эффективности внедренных мер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Азовская оросительная система, оросительные системы, гидродинамическое моделирование, дефицит воды, водораспределение, сценарное моделирование, оптимизация управления, техническое состояние, гидротехнические сооружения, автоматизация водопользования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гостищев В. Д., Пономаренко Т. С., Рыжаков А. Н., Бреева А. В. Обоснование стратегий модернизации оросительных систем на основе сценарного моделирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 26–42. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-26-42; EDN: LZXDYI

© Гостищев В. Д., Пономаренко Т. С., Рыжаков А. Н., Бреева А. В., 2026

Justification of Strategies for Irrigation System Modernization Based on Scenario Modeling

Vyacheslav D. Gostishchev, Taisiya S. Ponomarenko, Alexeyi N. Ryzhakov, Anna V. Breeva

ann22hp@mail.ru

Russian Research Institute of Land Reclamation Problems, Novocherkassk, Russia

ABSTRACT

Relevance. The relevance of this article is driven by growing climate uncertainty and the critical deterioration of irrigation infrastructure (up to 60–70%), which renders planning based on averaged indicators ineffective. The transition to proactive management methods, particularly scenario modeling, allows for advance assessment of system vulnerabilities, determination of modernization priorities, and ensuring water use sustainability under conditions of water deficit. **Methods.** A classification of causes for deviations of actual water consumption volumes from planned indicators is proposed, divided into technical (infrastructure wear, malfunction of irrigation equipment, lack of automation, mechanization, and hydrometry), managerial (personnel shortage), as well as objective external causes (changes in hydrometeorological conditions). For each cause, typical optimization scenarios have been developed with a quantitative assessment of the expected effect. **Results.** It was established that implementing optimization scenarios allows reducing water losses by 10–50 %, increasing the system efficiency coefficient to 0.80–0.85, and reducing the water delivery deficit in tail-end sections by 30–50 %. A system for ranking sections of the irrigation network based on criteria of water deficit magnitude and duration (ranks 1–4) has been introduced, which allows forming priority roadmaps of measures. A standardized eight-stage optimization cycle is proposed: from diagnostics and calibration of the hydrodynamic model to monitoring the effectiveness of implemented measures.

KEYWORDS: Azov Irrigation System; irrigation systems; hydrodynamic modeling; water deficit; water distribution; scenario modeling; management optimization; technical condition; hydraulic structures; water use automation

FOR CITATION: Gostishchev V. D., Ponomarenko T. S., Ryzhakov A. N., Breeva A. V. Justification of Strategies for Irrigation System Modernization Based on Scenario Modeling. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 3. P. 26–42. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-26-42; EDN: LZXDYI

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство во многих регионах мира остается критически зависимым от искусственного орошения. Глобальное потепление нарушает историческую устойчивость гидрологического цикла, смещая сезонность осадков и увеличивая потенциальное испарение. Учащение экстремальных погодных аномалий, включая продолжительные периоды высоких температур и интенсивные ливни, вызывает резкие колебания доступности влаги, нарушая традиционные схемы водообеспечения**.** Однако функционирование

оросительных систем происходит в условиях растущей неопределенности: изменение климатических режимов приводит к непредсказуемости состояния водных ресурсов, учащаются периоды засухи, а рост конкуренции за воду между отраслями усложняет планирование водопользования. Одновременно износ оросительной инфраструктуры в ряде регионов достигает 60–70 %, что повышает риски сбоев в водоснабжении сельскохозяйственных культур в критические фазы их развития[1] [1–5].

Традиционные методы проектирования и управления оросительными системами, основанные на усредненных гидрометеорологических показателях, теряют эффективность в условиях изменчивости внешней среды. Для обеспечения устойчивости водоснабжения аграрного сектора требуется переход к проактивным подходам, позволяющим оценивать работоспособность систем до наступления критических ситуаций. Сценарное моделирование представляет собой инструмент стратегического анализа, с помощью которого можно протестировать поведение сложных технических систем при различных комбинациях внешних и внутренних факторов – от экстремальных климатических явлений до отказов оборудования или изменения структуры посевов [6–10].

Применение сценарного подхода к оросительным системам позволяет не только выявить уязвимые элементы инфраструктуры, но и обосновать приоритеты модернизации, оптимизировать режимы водораспределения и разработать адаптивные алгоритмы управления. Особенно актуально это для территорий с дефицитом водных ресурсов, где каждый кубометр воды должен использоваться с максимальной эффективностью [11–14].

На международном уровне сценарное моделирование и адаптивные стратегии уже стали стандартом управления водными ресурсами: в ЕС и Нидерландах они применяются для оценки климатической устойчивости инфраструктуры, в Австралии – для оптимизации водораспределения в условиях дефицита, а в США и Израиле активно внедряются «цифровые двойники» и системы поддержки решений на базе машинного обучения[2].

Цель представленного исследования – разработка и апробирование методики сценарного моделирования функционирования оросительной системы для оценки ее устойчивости и эффективности в условиях вариабельности климатических, гидрологических и эксплуатационных факторов. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач: формализацию ключевых факторов неопределенности; построение репрезентативного набора сценариев развития событий; разработку имитационной модели взаимодействия компонентов оросительной системы; количественную оценку пока-

1 Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга». [Электр. ресурс]. Режим доступа: https://informraduga.ru/sites/ all/files/presentation_potencial.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

2 WaterGuide: руководство по формированию путей к улучшенному управлению водными ресурсами и водопользованию в условиях дефицита воды (русская версия). Australian Water Partnership, Канберра. 2019. Режим доступа: https://waterpartnership.org.au/wp-content/uploads/2024/03/WaterGuide-Russian-Edition.pdf (дата обращения: 13.03.2026).

зателей надежности и эффективности системы в каждом сценарии; выработку рекомендаций по повышению адаптивности системы к неблагоприятным условиям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на основе условно-типовой оросительной системы регулярного типа, параметры которой сформированы на основе усредненных нормативных значений для равнинных сельскохозяйственных массивов Юга России и фактических данных Азовской оросительной системы (Ростовская область) [15].

В качестве базовых характеристик приняты следующие показатели: общая площадь орошения составляет 3 тыс. га при проектной мощности 37,2 тыс. га. Протяженность магистрального канала достигает 92 км. Система включает 9 регулирующих гидротехнических сооружений, а водоснабжение осуществляется из реки с гарантированным расходом в меженный период[3,4].

Гидравлический режим канала характеризуется фактическим расходом в голове системы на уровне 10 м³/с. Скорость течения воды варьирует в пределах 0,05–0,25 м/с при уклонах дна 0,0001–0,0003. Форма поперечного сечения – трапецеидальная, однако вследствие эксплуатационных деформаций она частично нарушена. Коэффициент шероховатости по Маннингу [16] принят в диапазоне 0,030–0,045, что отражает влияние интенсивного зарастания русла водной растительностью.

Грунтовые условия представлены преимущественно суглинками и глинами. Коэффициент фильтрации [17] ложа канала составляет 0,1–1 м/сут из-за разуплотнения грунта корневой системой растений.

Эксплуатационное состояние системы оценивается как неудовлетворительное: физический износ инфраструктуры достигает 70 %, что проявляется в деформации берегов, зарастании русел и заилении. Управление водораспределением осуществляется вручную. Гидрометрическое обеспечение минимально (три поста), наблюдается недостаток механизации службы эксплуатации и низкая оснащенность хозяйств оросительной техникой. Структура посевных площадей включает 40 % зерновых культур, 35 % пропашных и 25 % многолетних насаждений.

Для каждого сценария теоретически задавали: граничные условия на входе, внутренние параметры сети (шероховатость, пропускная способность), схемы управления, структуру посевов, климатические возмущения. Моделирование выполнено для условного вегетационного периода.

3 Паспорт мелиоративной системы: «Азовская ОС». Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга» [Электр. ресурс]. URL: https://inform-raduga.ru/gts/599 (дата обращения: 19.03.2026).

4 Реконструкция орошаемых земель совхоза «Луговой» Аксайского района Ростовской области и повышение водообеспеченности Азовской оросительной системы. Стадия: рабочий проект. Кн. 6. Азовский магистральный канал. Пояснительная записка. Чертежи. Ростов на Дону: Южгипроводхоз, 1988. 134 с.

Рассчитаны относительные показатели эффективности: изменение КПД системы, объема нецелевых потерь, равномерности водораспределения, времени реакции на возмущения. Сравнение всех сценариев проведено относительно соответствующих базовых вариантов.

Исследование носит методологический характер: все сценарии и параметры являются теоретическими и предназначены для демонстрации возможностей сценарного подхода к оценке устойчивости и эффективности оросительных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработано 28 теоретических сценариев, сгруппированных в семь блоков (рисунок): базовые (референтные) сценарии для каждого блока; сценарии деградации («без изменений»); сценарии улучшения (локальная и комплексная реконструкция, автоматизация, механизация и др.); стрессовые и аварийные сценарии.

Долгосрочная эффективность мелиоративных систем зависит от регулярности эксплуатационно-восстановительных работ, а не только от качества их первоначального проектирования и возведения. Без регулярного ухода даже новая сеть быстро превращается в заросшее, заиленное русло, где вода теряет скорость, напор и направление. Базовый (референтный) сценарий воспроизводит текущее состояние системы: режимы водоподачи, гидравлические параметры (уровни, расходы, скорости), дефекты инфраструктуры (утечки, засоры, повреждения ГТС) и повышенные коэффициенты шероховатости. Результат – карта дефицитных и избыточно увлажненных участков, оценка нецелевых потерь и зон аварийного риска. Сценарий служит эталоном для сравнения альтернатив.

Блок 1. Неудовлетворительное техническое состояние водопроводящей сети и гидротехнических сооружений государственных и внутрихозяйственных мелиоративных систем

Водопроводящие сети и гидротехнические сооружения мелиоративных систем накопили критический износ: разрушена облицовка каналов, корродированы трубопроводы, деформированы береговые укрепления, заросли русла. Это снижает пропускную способность, увеличивает гидравлические потери и повышает аварийность. Для оценки состояния и выбора стратегии развития применяется сценарное моделирование.

Сценарий «без изменений» (S1) моделирует деградацию системы при отсутствии ремонтов: рост утечек, снижение пропускной способности из-за зарастания и осадконакопления, деформация конструкций. К концу прогнозного периода КПД системы падает на 15–30 %, частота нарушений возрастает на 25–40 %, особенно в паводковые периоды.

Сценарий локальной реконструкции (S2) предполагает точечное восстановление наиболее изношенных элементов: замену участков каналов и трубопроводов, ремонт насосных станций и регуляторов, укрепление берегов. Эффект: снижение утечек на 10–20 %, сокращение дефицита воды на концевых участках на 30–50 %, формирование приоритетного перечня объектов для инвестиций.

Сценарий комплексной реконструкции (S3) включает системную модернизацию: замену открытых каналов закрытыми трубопроводами, обновление ГТС с автоматизированными затворами и датчиками, внедрение единой системы мониторинга и диспетчеризации. Результат: снижение неучтенных потерь на 20–50 %, рост КПД системы, переход к прогнозному управлению.

Сценарий адаптации к изменению климатических условий (S4) учитывает снижение стока, рост частоты засух и ливней, смещение фаз водопотребления. Моделирование выявляет уязвимые участки и обосновывает строительство резервных емкостей, внедрение водосберегающих технологий. Ожидаемый эффект – снижение ущерба от засух и паводков на 25–40 %.

Сценарий оптимизации режимов водораспределения (S5) фокусируется на совершенствовании управления без капитальных вложений: гибкие графики подачи, дифференцированный полив с учетом фазы вегетации и данных дистанционного зондирования (NDVI, влажность почвы). Результат: снижение нецелевого расхода на 15–30 %, повышение коэффициента водопользования до 0,80–0,90.

Аварийные сценарии (S6) моделируют последствия отказов критических элементов (прорыв дамбы, отказ насосной станции, обрушение канала). Анализ позволяет определить зоны затопления, разработать резервные схемы переброски потоков, обосновать резервирование узлов. Эффект: сокращение времени реагирования до 2–4 часов, снижение площади затопления на 30–60 % при наличии резервных маршрутов.

Блок 2. Недостаточное оснащение средствами автоматизированного управления водораспределением мелиоративных систем

Ручное управление мелиоративной системой, основанное на усредненных графиках и визуальных наблюдениях, приводит к системным дисбалансам: переливам на одних участках и дефициту воды на других, особенно на концевых участках сети.

Сценарий частичной автоматизации (S1) предполагает установку датчиков уровня и расхода на ключевых узлах и применение простых логических правил управления (например, коррекцию затворов при превышении заданного уровня). Эффект: снижение колебаний уровней на 30–50 %, сокращение времени реакции в 2–3 раза, повышение равномерности водораспределения на 20–35 %.

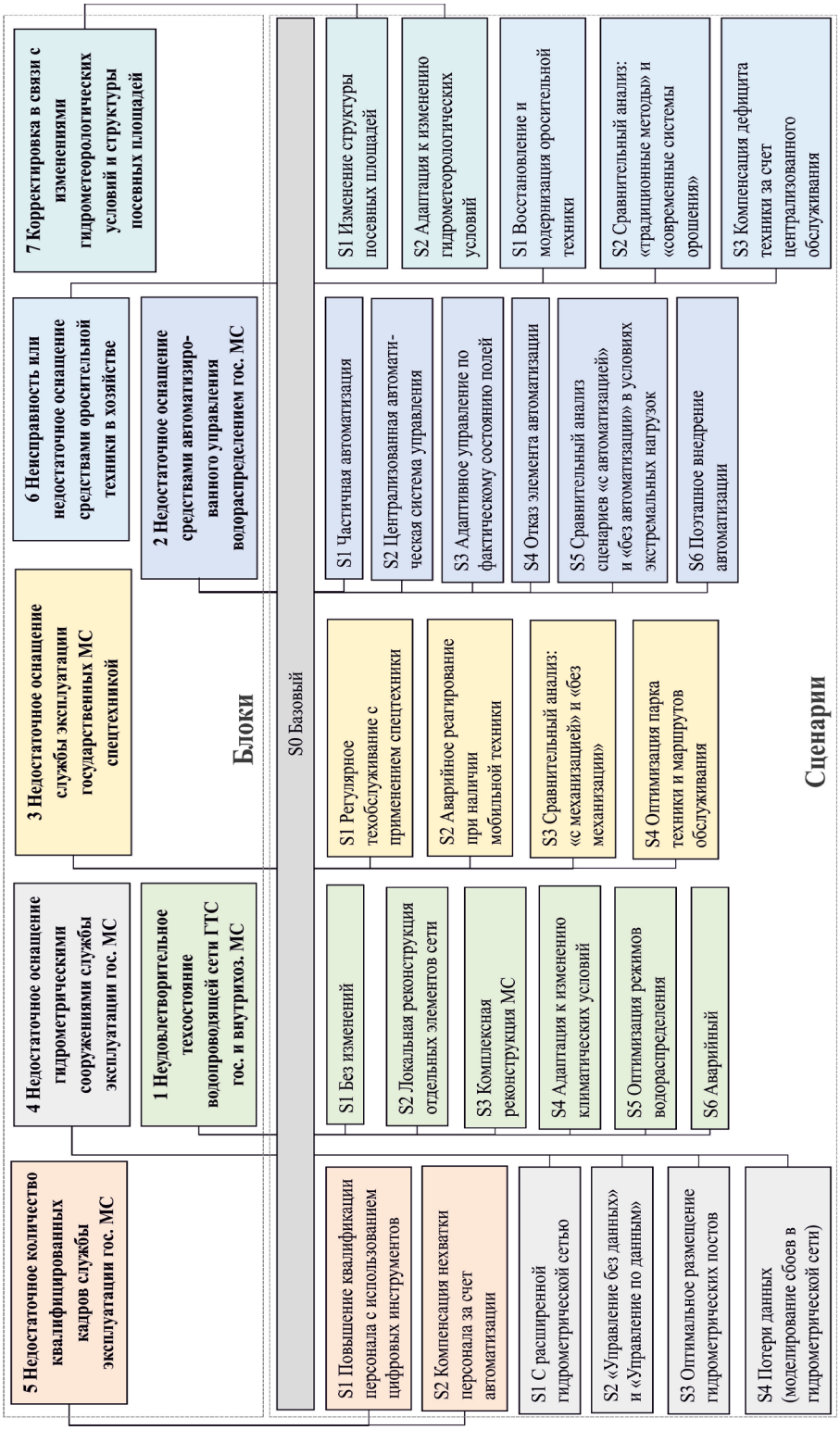


Рисунок. Типовые сценарии моделирования
Figure. Typical modeling scenarios

Сценарий централизованной автоматической системы управления (S2) объединяет датчики, исполнительные механизмы и гидродинамическую модель в единую систему с обратной связью и прогнозированием. Учет метеоданных, фазы вегетации и испарения позволяет формировать опережающие управляющие воздействия. Результат: снижение нецелевых потерь на 25–40 %, сокращение эпизодов дефицита/избытка воды на 50–70 %, повышение коэффициента полезного водопользования до 0,80–0,85.

Сценарий адаптивного управления по состоянию полей (S3) интегрирует данные дистанционного зондирования (индексы растительности NDVI, влажность почвы) в алгоритмы распределения воды. Полив адаптируется под реальные потребности культур, а не под жесткий календарный график. Эффект: снижение объема подаваемой воды на 15–25 % без ущерба урожайности, повышение коэффициента водопользования до 0,85–0,90.

Сценарий отказа элемента автоматизации (S4) моделирует последствия выхода из строя датчиков, обрыва связи или отключения питания. Грамотно спроектированная система с дублированием критических компонентов и резервными каналами связи сокращает время восстановления режима до 2–3 часов и снижает риск аварий на 40–60 %.

Сравнительный анализ (S5) в экстремальных условиях (засуха, паводки, резкий рост водопотребления) показывает, что автоматизированная система восстанавливает штатный режим в 2–4 раза быстрее, а число аварийных ситуаций на ней ниже на 50–75 % по сравнению с ручным управлением.

Сценарий поэтапного внедрения (S6) предлагает начинать с головных сооружений (эффект до 20 % снижения потерь при минимальных затратах), далее переходить к магистральным каналам и узлам перераспределения и лишь затем – к распределительной сети. Такой подход обеспечивает окупаемость каждого этапа и в итоге дает снижение водопотерь на 35–50 % при сокращении сроков окупаемости инвестиций.

Блок 3. Недостаточное оснащение службы эксплуатации мелиоративных систем средствами механизации и специальной техникой

Сценарий регулярного технического обслуживания с применением специализированной техники (S1) обеспечивает циклический режим работы: каналоочистители и гидроудалители работают по графику (например, ежеквартально), восстанавливая проектное сечение русла и нормализуя шероховатость. После каждого цикла параметры сети корректируются в модели, отражая постепенное возвращение к расчетным характеристикам. Результат – стабилизация уровней и расходов, снижение гидравлических потерь на 25–35 %, восстановление пропускной способности до 90–95 % от проектной. Число эпизодов дефицита воды на полях сокращается на 40–60 %, вода вновь достигает конечного потребителя в нужном объеме и вовремя.

Однако даже при регулярном обслуживании аварии неизбежны. Сценарий аварийного реагирования (S2) моделирует критическую ситуацию – резкое перекрытие канала из-за обвала берега или скопления растительности. Разница между «до» и «после» оказывается решающей: при отсутствии мобильной техники ликвидация завала занимает до недели, при наличии – менее суток. Сокращение времени реагирования в 5–7 раз напрямую снижает объем дефицита водоподачи на 60–80 %, минимизируя ущерб для сельскохозяйственного производства. Мобильная техника становится не просто инструментом ремонта, а страховкой от катастрофических потерь урожая.

Сравнительный анализ «с механизацией» и «без механизации» (S3) обобщает эти эффекты в цифрах. К концу сезона в варианте без техники лишь 50–60 % каналов сохраняют проектную пропускную способность, суммарные водопотери достигают критических значений. При наличии техники 80–90 % сети функционирует штатно, потери снижаются на 20–30 %. Эти данные формируют экономическое обоснование инвестиций: механизация перестает восприниматься как затрата и обретает статус фактора устойчивости всей системы.

Но эффективность механизации зависит от ее организации. Сценарий оптимизации парка техники и маршрутов обслуживания (S4) решает задачу разумного баланса: как обеспечить максимальный охват при минимальных ресурсах. Моделирование различных конфигураций (один каналоочиститель на 50 км, два на 100 км и т. д.) с учетом протяженности сети, труднодоступности участков и частоты засоров позволяет сформировать оптимальные графики выездов. Результат – снижение простоев техники на 20–25 %, охват 95 % сети при минимальном парке, сокращение среднего времени реакции на заявку до 24 часов. Таким образом, механизация обслуживания – это не набор машин, а стратегия поддержания жизнеспособности водной артерии. От хаотичных аварийных выездов – к плановому профилактическому уходу, от избыточного парка – к оптимизированной логистике.

Блок 4. Недостаточное оснащение гидрометрическими сооружениями службы эксплуатации государственных мелиоративных систем

Отсутствие достаточной гидрометрической сети лишает службу эксплуатации объективной информации о движении воды по системе. При минимальном оснащении (датчики только у головных сооружений) расходы на промежуточных участках оцениваются приблизительно, потери рассчитываются по нормам, а реальное распределение воды между потребителями остается неизвестным. Базовый сценарий (S0) выявляет критическую погрешность водного баланса, невозможность обнаружить утечки и несанкционированные водозаборы, а также неравномерность полива, снижающие эффективность деятельности водопользователей.

Сценарий с расширенной гидрометрической сетью (S1) предполагает установку автоматических датчиков уровня и расхода воды на головных сооружениях, узлах перераспределения и концах магистральных каналов с передачей данных в реальном времени. Интеграция измерений в гидродинамическую модель снижает погрешность расчетов до 10 %, обеспечивает оперативное выявление аномалий (утечек, засоров) и сокращает время обнаружения аварий до 1–3 часов. Система приобретает способность к самодиагностике и достоверному водному балансу по участкам.

Сравнительный сценарий «управление без данных» и «управление по данным» (S2) количественно оценивает ценность измерений. Управление по фактическим показаниям (а не по усредненным графикам) снижает водопотери на 15–30 %, сокращает случаи неравномерного полива на 40–60 % и повышает коэффициент полезного водопользования до 0,75–0,85. Информация становится ключевым ресурсом эффективного управления.

Сценарий продуктивного размещения гидрометрических постов (S3) обеспечивает оптимальную пропорцию между охватом мониторинга и затратами на модернизацию. Анализ эффективности и соотношения «затраты – точность» показывает: установка 30–40 % от максимально возможного количества постов в приоритетных точках (головные сооружения, узлы распределения, концевые участки) обеспечивает 90 % информативности системы. Такой иерархический подход минимизирует капитальные и эксплуатационные затраты при сохранении высокой управляемости.

Сценарий потери данных (S4) моделирует последствия отказа датчиков, обрыва связи или отключения питания. Без резервирования сбои в течение 24–72 часов приводят к отклонению режима от заданного и возникновению дефицита или перелива. Анализ выявляет «точки одиночного отказа» и обосновывает необходимость дублирования датчиков на критических узлах, резервных каналах связи и алгоритмов экстраполяции на основе смежных постов. Способность системы к сохранению функциональности становится условием безопасности водоснабжения.

Гидрометрическое оснащение – фундамент прозрачного и ответственного управления. Оно превращает водный баланс из формального документа в инструмент контроля, снижает потери, повышает равномерность полива и восстанавливает доверие водопользователей к службе эксплуатации. В условиях дефицита водных ресурсов измерение становится не технической процедурой, а условием устойчивого функционирования мелиоративной системы.

Блок 5. Недостаточное количество квалифицированных кадров службы эксплуатации мелиоративных систем

Дефицит квалифицированного персонала приводит к функциональной деградации мелиоративной системы: задержкам в принятии решений, отсут-

ствию реакции на изменения гидравлического режима, упрощенным расчетам водопотребления без учета текущих условий. Режимы сводятся к жестким графикам без корректировки, что отражается на пропускной способности каналов из-за несвоевременной очистки, приводит к хроническому дефициту воды на концевых участках, увеличению неучтенных потерь и росту аварийности из-за несвоевременной диагностики.

Сценарий повышения квалификации персонала с использованием цифровых инструментов (S1) предполагает его обучение на гидравлическом симуляторе (например, на базе программного комплекса MIKE). Сотрудники отрабатывают реакцию на засоры, паводки и другие ситуации в виртуальной копии сети, учатся интерпретировать данные датчиков и прогнозы модели. Управленческие решения предварительно тестируются в модели. Эффект – снижение ошибок управления на 40–60 %, сокращение времени реакции на 50–70 %, повышение равномерности орошения до 85–90 % от проектной нормы.

Сценарий компенсации нехватки персонала за счет автоматизации (S2) применяется в условиях острого кадрового дефицита. Алгоритмы автоматического регулирования, интегрированные с датчиками уровня и расхода воды, берут на себя рутинные функции: поддержание заданных параметров, корректировку затворов, стабилизацию давления. Персонал сохраняет роль диспетчера – принимает стратегические решения и реагирует на нештатные ситуации. В результате штатные «ручные» решения сокращаются на 60–80 %, ускоряются процессы восстановления рабочего режима после отклонений от нормальных параметров в 2–4 раза, обеспечивается стабильная эксплуатация мелиоративных систем при минимальной численности персонала.

Автоматизация и обучение – взаимодополняющие стратегии. Автоматизированные системы обеспечивают базовую стабильность и выполняют типовые операции по заданным алгоритмам, но только квалифицированный специалист способен принимать ответственные решения в нестандартных ситуациях и корректировать режимы работы системы с учетом агротехнических требований. Оптимальный подход сочетает оба направления: автоматизацию для надежности и обучение для стратегического управления.

Блок 6. Неисправность или недостаточное оснащение средствами оросительной техники

Мелиоративная система теряет смысл, если вода, доставленная по каналам к границе хозяйства, не может быть эффективно распределена по полям из-за неисправной или отсутствующей оросительной техники. Базовый сценарий фиксирует эту проблему: дождевальные машины простаивают, капельные системы отсутствуют или засорены, полив осуществляется фрагментарно или вручную. Коэффициент фактического водопотребления падает до 50–60 % от запрошенного, остальная вода уходит в сбросы, испаряется или фильтруется

мимо корневой зоны растений. Последствия – недоиспользование орошаемых площадей, снижение урожайности и нулевая экономическая отдача от вложений в инфраструктуру.

Сценарий восстановления и модернизации оросительной техники (S1) предполагает замену устаревших дождевальных машин на современные комплексы (фронтального или кругового действия) и внедрение капельных систем для высокотоварных культур. Точечная доставка воды в прикорневую зону повышает равномерность увлажнения и снижает потери. Это позволяет сократить нецелевые потери на поле на 30–50 %, повысить коэффициент полезного водопользования до 0,8–0,9, увеличить реально орошаемые площади на 20–40 % без увеличения объема водозабора. Равномерный водозабор снижает пиковую нагрузку на магистральную сеть.

Сравнительный анализ «традиционных методов» и «современных систем» (S2) выявляет принципиальную разницу в эффективности. Заливной полив характеризуется потерями 40–60 % воды на испарение и фильтрацию, низкой равномерностью и зависимостью от рельефа. Дождевание и капельное орошение минимизируют потери, исключая зависимость от рельефа и повышая устойчивость к кратковременным перебоям подачи воды (влага в корнеобитаемом слое сохраняется несколько часов). В результате повышается на 20–40 % эффективность водопользования, на 25–35 % снижаются пиковые нагрузки на сеть.

Сценарий централизованного обслуживания (S3) предлагает решение для хозяйств с ограниченными инвестиционными возможностями: создание мобильных поливальных бригад или кооперацию нескольких хозяйств с единым парком техники. При грамотном планировании графиков (с учетом критических фаз вегетации) и расчете пиков водозабора обеспечивается охват 70–90 % орошаемых площадей. Это промежуточная стратегия поэтапного перехода к собственной технике.

Блок 7. Корректировка мелиоративной системы в связи с изменениями гидрометеорологических условий по инициативе водопользователей или органов исполнительной власти

Мелиоративная система должна адаптироваться к динамике внешней среды: изменению климата, смещению фаз вегетации и трансформации структуры посевов под влиянием рыночных или управленческих решений. Жесткие нормативные режимы водораспределения в этих условиях становятся фактором риска, а гибкость управления – условием устойчивости системы. Сценарное моделирование позволяет заранее оценить последствия изменений и выработать адаптационные меры.

Сценарий изменения структуры посевных площадей (S1) моделирует два противоположных сценария:

– смена структуры посевов в пользу влаголюбивых культур (овощи, картофель, кукуруза) вместо зерновых (пшеница, ячмень) повышает суммарное водопотребление на 15–30 % и увеличивает пиковую нагрузку на сеть;

– переход на засухоустойчивые культуры (просо, сорго) в условиях дефицита воды гарантирует снижение водопотребления на 15–30 %, смещение пиков водозабора на 10–20 дней.

Моделирование обновляет карты водопотребления, пересчитывает графики полива с учетом новых фенологических фаз и выявляет риски дефицита или избытка воды на отдельных участках. Полученные результаты становятся основой для согласованных действий органов управления и водопользователей.

Сценарий адаптации к изменению гидрометеорологических условий (S2) учитывает прогнозируемые изменения: снижение весеннего стока, увеличение продолжительности засух, смещение сроков вегетации. Модель тестирует меры адаптации – приоритетное водоснабжение уязвимых культур в критические фазы, дифференцированный полив, снижение норм на менее значимых этапах, создание резервных емкостей. Эффект от ее внедрения – снижение ущерба от засухи на 20–35 %, сокращение объема недоотпущенной воды на 25–40 % за счет гибких управленческих решений.

Корректировка режимов работы – это переход от статичного нормативного управления к динамическому, прогнозному. Система обретает способность адаптироваться к изменениям климата и экономических приоритетов. В современных условиях устойчивое развитие мелиорации заключается в способности системы трансформироваться вместе с изменяющимися климатическими и экономическими условиями.

ВЫВОДЫ

Проведенная работа по теоретическому моделированию функционирования оросительной системы в 28 сценариях подтверждает, что устойчивость и эффективность мелиоративной инфраструктуры определяются не отдельными элементами, а целостностью подхода к ее эксплуатации и управлению. Базовые сценарии четко фиксируют системные уязвимости – износ сети, дефицит автоматизации, недостаток техники и кадров, устаревшие методы полива. Однако ключевой вывод исследования заключается в другом: каждая из этих проблем имеет научно обоснованный подход решения, а их взаимодополнение формирует качественно новое состояние системы.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии методологии сценарного анализа применительно к мелиоративным системам. Разработанный подход формализует взаимосвязь между климатической вариабельностью, физическим износом инфраструктуры и операционными ограничениями, предлагая воспроизводимый алгоритм оценки надежности и эффективности водохозяйственных объектов в условиях гидрологической неустойчивости.

Моделирование показало, что даже точечные меры дают ощутимый эффект: локальная реконструкция снижает дефицит воды на концевых участках на 30–50 %, частичная автоматизация сокращает колебания уровней на 30–50 %, а мобильная техника уменьшает время ликвидации аварий в 5–7 раз. Однако максимальная отдача достигается при комплексной стратегии, заключающейся в сочетании механизированного обслуживания, цифрового управления, оптимизированной гидрометрической сети и адаптивного водораспределения. В совокупности такие меры способны повысить коэффициент полезного использования воды до 0,85–0,90, снизить нецелевые потери на 35–50 % и обеспечить устойчивость системы к климатическим и эксплуатационным воздействиям.

Важно подчеркнуть, что эффективность решений зависит не от масштаба вложений, а от их последовательности и обоснованности. Поэтапное внедрение автоматизации, оптимизация парка техники, централизованное обслуживание хозяйств с ограниченными ресурсами – все эти подходы превращают ограниченные возможности в управляемые параметры развития.

Сценарный метод, примененный в представленной работе, доказал свою эффективность как инструмент проактивного управления. Он позволяет заблаговременно спрогнозировать критические ситуации, обосновывать приоритетное распределение ресурсов и в конечном итоге адаптировать систему к изменяющейся реальности. Возможности непосредственного использования разработанных сценариев и количественных индикаторов для выбора приоритетов модернизации на уровне конкретных водопользователей и бассейновых управлений составляют практическую значимость исследования.

Результаты исследования формируют методологическую основу для разработки «дорожных карт» модернизации мелиоративных систем. Перспективы дальнейших исследований связаны с верификацией имитационной модели на реальных объектах орошения, расширением сценарного набора за счет интеграции экономических факторов (стоимость воды, тарификация, оценка возврата инвестиций) и внедрением алгоритмов машинного обучения для динамической калибровки параметров в режиме реального времени.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольгаренко Г. В., Васильев С. М., Балакай Г. Т. Концепция Государственной программы «Восстановление и развитие мелиоративного комплекса Российской Федерации на период 2020–2030 годов». Новочеркасск: РосНИИПМ, 2019. 128 с.

2. Шевченко В. А., Исаева С. Д., Дедова Э. Б. Новый этап развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 4. С. 355–361. https://doi.org/10.31857/S086958732-3040114. EDN: SDJBQR
3. Масный Р. С., Сенчуков Г. А., Абраменко И. П. Актуальные вопросы эффективности водопользования в мелиоративном комплексе современной России // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5. № 2. С. 1–13. https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-2-1-13
4. Угрюмова А. А., Паутова Л. Е., Гришаева О. Ю. Точки роста эффективности использования мелиоративного потенциала России // Вестник Челябинского государственного университета. 2021. № 10 (456). С. 51–58.
5. Александровская Л. А. Проблемы эффективного использования водных ресурсов в агромелиоративной сфере // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3. № 4. С. 82–87. https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-4-82-87. EDN: HMLRCT
6. Рогачев Д. А. Повышение эффективности управления водопользованием оросительных систем: методология и технология // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025. Т. 26. № 4. С. 840–851. https://doi.org/I 10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851. EDN: PMGNHD
7. Ткачев А. А., Ольгаренко И. В. Современные проблемы в управлении водо-распределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелио-рации. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–23. https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN: NTRFMJ
8. Шаповалов В. Л., Корниенко Е. В. Способ формирования пространственной основы для моделирования // Транспорт: наука, образование, производство: материалы межд. научно-практ. конф., Ростов-на-Дону, 24–26 апреля 2024 г. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. С. 58–62. EDN: MXAKOD
9. Зарубин В. В., Титаренко Д. В., Бочкарева Н. А. Использование локального управления водораспределением при повышении эффективности оросительных систем // Вестник мелиоративной науки. 2021. № 1. С. 15–19. EDN: SMNHFC
10. Батыкова А. Ж., Бейшекеев К. К. Автоматизация системы управления в оросительных системах для повышения эффективности водопользования // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2025. Т. 25, № 4. С. 20–27. https://doi.org/10.36979/1694-500X-2025-25-4-20-27. EDN: LKOOUK
11. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В., Коржов И. В. Функции планирования водопользования на оросительных системах с использованием современных IT-технологий // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 1. С. 34–40.
12. Сенчуков Г. А., Пономаренко Т. С. Применение компьютерного моделирования режимов водопотребления и водораспределения для повышения эффективности организации водопользования на оросительных системах // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 4(64) С. 27–31.
13. Юрченко И. Ф. Интеграция цифровых систем в сферу агропроизводства на мелиорированных землях // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 4. С. 73–80. https://doi.org/10.34286/1995-4646-2020-73-4-73-80. EDN: JRBYVH
14. Бандурин М. А., Руденко А. А. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений // Передовые исследования Кубани: сб. материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 15–17 мая 2023 года. Краснодар: Кубанский научный фонд, 2023. С. 58–62. EDN: RTGICA.
15. Сенчуков Г. А., Гостищев В. Д. Анализ состояния и перспективы водораспределения на Азовской оросительной системе // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. Т. 95. № 1. 2025. С. 137–155.

16. Бакланова Д.В., Баев О.А. Оценка гидравлической шероховатости русла магистрального канала // Природообустройство. 2023. № 1. С. 76–81. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-1-76-81
17. Талалаева В. Ф., Баев О. А. Результаты оценки коэффициента полезного действия необлицованных мелиоративных каналов // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 1. С. 23–42. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-23-42

REFERENCES

1. Olgarenko G. V., Vasiliev S. M., Balakai G. T. Concept of the State Program “Restoration and Development of the Land Reclamation Complex of the Russian Federation for 2020–2030”. Novocherkassk: RosNIIPM, 2019. 128 p.
2. Shevchenko V. A., Isaeva S. D., Dedova E. B. A New Stage in the Development of the Land Reclamation and Water Management Complex of the Russian Federation. *Vestnik of the Russian Academy of Sciences*. 2023. Vol. 93. No. 4. P. 355–361. https://doi.org/10.31857/S086958-7323040114
3. Masny R. S., Senchukov G. A., Abramenko I. P. Current Issues of Water Use Efficiency in the Land Reclamation Complex of Modern Russia. *Ecology and Water Management.* 2023. Vol. 5. No. 2. P. 1–13. https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-2-1-13
4. Ugryumova A. A., Pautova L. E., Grishaeva O. Yu. Growth Points for Improving the Efficiency of Russia’s Land Reclamation Potential. *Bulletin of Chelyabinsk State University.* 2021. No. 10 (456). P. 51–58.
5. Aleksandrovskaya L. A. Problems of Efficient Water Resources Use in the Agro-Reclamation Sector. *Economics and Ecology of Territorial Formations*. 2019. Vol. 3. No. 4. P. 82–87. https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-4-82-87
6. Rogachev D. A. Improving the Efficiency of Water Management in Irrigation Systems: Methodology and Technology. *Agrarian Science of the Euro-North-East.* 2025. Vol. 26. No. 4. P. 840–851. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851
7. Tkachev A. A., Olgarenko I. V. Modern Problems in Water Distribution Management in Main Canals of Irrigation Systems. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 1–23. https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23
8. Shapovalov V. L., Kornienko E. V. Method of Forming a Spatial Framework for Modeling. In: Transport: Science, Education, Production: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 24–26, 2024. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2024. P. 58–62.
9. Zarubin V. V., Titarenko D. V., Bochkareva N. A. Use of Local Water Distribution Control to Improve the Efficiency of Irrigation Systems. *Bulletin of Reclamation Science*. 2021. No. 1. P. 15–19.
10. Batykova A. Zh., Beishekeev K. K. Automation of Control Systems in Irrigation Networks to Enhance Water Use Efficiency. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2025. Vol. 25. No. 4. P. 20–27. https://doi.org/10.36979/1694-500X-2025-25-4-20-27
11. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V., Korzhov I. V. Water Use Planning Functions in Irrigation Systems Using Modern IT Technologies. Land Reclamation and Water Management. 2025. No. 1. P. 34–40.
12. Senchukov G. A., Ponomarenko T. S. Application of Computer Modeling of Water Consumption and Distribution Regimes to Improve the Efficiency of Water Use Organization in Irrigation Systems. *Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2016. No. 4 (64). P. 27–31.
13. Yurchenko I. F. Integration of Digital Systems into Agricultural Production on Reclaimed Lands. *International Technical and Economic Journal.* 2020. No. 4. P. 73–80. https://doi.org/10.34286/1995-4646-2020-73-4-73-80
14. Bandurin M. A., Rudenko A. A. Monitoring of Technical Condition and Assessment of Residual Life of Long-Operated Hydraulic Structures. In: Advanced Research of Kuban: Proceedings of the Annual

Report Conference of Grant Holders of the Kuban Scientific Foundation, Sochi, May 15–17, 2023. Krasnodar: Kuban Scientific Foundation, 2023. P. 58–62.
15. Senchukov G. A., Gostishchev V. D. Analysis of the Current State and Prospects of Water Distribution in the Azov Irrigation System. *Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025. Vol. 95. No. 1. P. 137–155.
16. Baklanova D. V., Baev O. A. Assessment of Hydraulic Roughness of the Main Canal Bed. *Environmental Engineering*. 2023. No. 1. P. 76–81. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-1-76-81
17. Talalaeva V. F., Baev O. A. Results of Efficiency Coefficient Assessment for Unlined Reclamation Canals. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025. Vol. 15. No. 1. P. 23–42. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-23-42

Сведения об авторах:

Гостищев Вячеслав Дмитриевич, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; https://orcid.org/0000-0002-0868-0712; e-mail: nb515@mail.ru

Таисия Сергеевна Пономаренко, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; https://orcid.org/0000-0002-2003-1686; e-mail: ponomarenko.taisia@yandex.ru

Алексей Николаевич Рыжаков, научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; http://orcid.org/0000-0002-9268-255X; e-mail: xrust.89@bk.ru

Бреева Анна Викторовна, научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; http://orcid.org/0000-0001-5835-1231; e-mail: ann22hp@mail.ru

About the author:

Vyacheslav D. Gostishchev, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0868-0712; e-mail: nb515@mail.ru

Taisia S. Ponomarenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2003-1686; e-mail: ponomarenko.taisia@yandex.ru

Aleksey N. Ryzhakov, Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; https://orcid.org/0000-0002-9268-255X; e-mail: xrust.89@bk.ru

Anna V. Breeva, Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; http://orcid.org/0000-0001-5835-1231; e-mail: ann22hp@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 13.04.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 14.05.2026.
Принята к публикации / Accepted 23.05.2026.