УДК 332.122

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-5-27

Оригинальная статья/Original paper

Переход региональных гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям на основе циркулярности

Л. Г. Матвеева[1], Е. В. Каплюк[2], Д. С. Гриднев[1]

lmatveeva@sfedu.ru

[1] *Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Поддержание экономической устойчивости и конкурентоспособности предприятий индустриальных сегментов регионов и их водохозяйственных комплексов (ВХК) в современных условиях напрямую зависит от способности субъектов ВХК внедрять новые бизнес-модели циркулярного типа путем наращивания цифрового потенциала. Поскольку указанные бизнес-модели в значительной степени определяются спецификой региона и его водохозяйственной сферы (ограниченностью водных ресурсов бассейна, нормативами водопотребления, оборотным использованием воды, противоречивостью интересов участников ВХК и др.), их изучение важно для определения способов модификации бизнес-моделей на базе цифровизации и концептов циркулярности, а также разработки практических механизмов адаптации и внедрения данных моделей в управление ВХК региона. **Методы.** Для разработки концепции и прикладного инструментария управления переходом к инновационным бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике методологическая база исследования сформирована путем конвергенции ряда теорий и подходов: системно-синергетического, динамического и ресурсно-целевого, адаптированных к специфике водного хозяйства. Для разработки модельно-методического инструментария оценки потенциала перехода региональной гидроэнергетической системы к новым индустриальным моделям замкнутого цикла задействовано комплиментарное использование совокупности методов, в числе которых: модели каузального машинного обучения, деревья решений, математическое моделирование, алгоритмы COMAC, многоагентное обучение с подкреплением. **Результаты.** Построена теоретическая рамка исследования и проведена систематизация цифровых бизнес-моделей компаний ВХК; уточнены теоретико-концептуальные представления о сущности и механизмах развития новых бизнес-моделей ВХК на базе цифровизации; осуществлено развитие теории цифровых бизнес-моделей применительно к ВХК региона; определены ключевые элементы моделей в логике их адаптивного развития, обусловленного цифровыми технологиями. Разработана математическая модель многоагентного обучения с подкреплением, выполняющая функцию поиска компромиссных стратегий взаимодействия агентов ВХК в условиях циркулярности с учетом конфликтов их интересов, которая является адаптивным инструментом поддержки принятия управленческих решений в рамках ВХК региона.

© Матвеева Л. Г., Каплюк Е. В., Гриднев Д. С., 2026.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроэнергетические системы, водохозяйственный комплекс, водные ресурсы, циркулярные бизнес-модели, цифровизация, многоагентные модели, регион, компромиссные стратегии взаимодействия акторов водного хозяйства

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-78-10044, https://rscf.ru/project/25-78-10044/ в Южном федеральном университете.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Матвеева Л. Г., Каплюк Е. В., Гриднев Д. С. Переход региональных гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям на основе циркулярности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 5–27. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-5-27; EDN: AZHLVM

Transition of regional hydropower systems to new industrial models based on circularity

Lyudmila G. Matveyeva[1], Ekaterina V. Kaplyuk[2], Danil S. Gridnev[1]

lmatveeva@sfedu.ru

[1] *Southern Federal university, Taganrog, Russia*
[2] *Southern Federal university, Rostov-on-Don, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Maintaining the stability and competitiveness of enterprises in industrial segments of regions and their water management complexes (VHK) in modern conditions is directly determined by the ability of VHK entities to introduce new circular business models by building up digital potential. Since these business models are largely determined by the specifics of the region and its water sector (limited water resources of the basin, water consumption standards, water recycling, conflicting interests of VHK participants, etc.), their study is important to determine ways to modify business models based on digitalization and concepts circularity, as well as the development of practical mechanisms for adapting and introducing these models into the management of the VHK region. **Methods.** To develop a concept and applied tools for managing the transition to innovative business models of a closed cycle in hydropower, the methodological base of the study was formed by the convergence of a number of theories and approaches: system-synergistic, dynamic and resource-target, adapted to the specifics of water management. To develop a model and methodological toolkit for assessing the potential for the transition of the regional hydropower system to new industrial closed-loop models, a complementary use of a set of methods was used, including causal machine learning models, decision trees, mathematical modeling, COMAC algorithms, multi-agent reinforcement learning. **Results.** A theoretical research framework was built and the digital business models of VHK companies were systematized; clarified theoretical and conceptual ideas about the essence and mechanisms of development of new business models of VHK subjects based on digitalization; the theory of digital business models was developed in relation to the subjects of the VHK region; key elements of models are identified in the logic of their adaptive development due to digital technologies. A mathematical model of multi-agent training with reinforcement has been developed, which per-

forms the function of searching for compromise strategies for the interaction of VHK agents in a circular environment, taking into account conflicts of their interests, which is an adaptive tool for supporting management decision-making within the VHK region.

KEYWORDS: Hydropower systems, water management complex, water resources, circular business models, digitalization, multi-agent models, region, compromise strategies for the interaction of water management actors

FINANCING: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 25-78-10044, https://rscf.ru/project/25-78-10044/ at Southern Federal University.

FOR CITATION: Matveyeva L. G., Kaplyuk E. V., Gridnev D. S. Transition of regional hydropower systems to new industrial models based on circularity. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 4. P. 5–27; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-5-27; EDN: AZHLVM

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной экономике системообразующая роль гидроэнергетических систем, в числе которых особые производственные и ресурсообеспечивающие функции выполняют водохозяйственные комплексы (ВХК) регионов, определяет возросшую интенсивность их последовательного перехода к новым индустриальным моделям на базе циркулярности и цифровизации. В координатах региона индустриальная модель понимается как «конкретный и определенный набор элементов организации труда, капитала и информации для создания и распределения ценности на некоторой территории» [1]. В парадигме общеэкономических тенденций масштабирования моделей экономики замкнутого цикла процесс указанного перехода в рамках ВХК детерминируется содержательно заложенными в самой природе и функционале водохозяйственного комплекса свойствами циркулярности и цикличности, включая оборотное водопользование [2, 3].

В условиях объективно существующего дефицита воды ее очистка, переработка и вовлечение в производство становятся дополнительным решением для удовлетворения спроса в этом ресурсе, что усиливает практическую значимость циркулярных бизнес-моделей, обладающих потенциалом обеспечения повторного использования вод при дренажном сбросе на ирригационных системах, на объектах электроэнергетики, нефтепереработки, химического производства, угольной промышленности и др. Тестируемое реальной практикой недостаточное инвестиционное стимулирование потребителей к повторной эксплуатации водных ресурсов, а также сопряженные с этим экологические проблемы [4, 5] и износ основных фондов имеют следствием некачественную очистку воды и ее потери при транспортировке. Решение этих и других вопросов лежит в плоскости партнерских взаимодействий всех субъектов ВХК (производителей, потребителей воды и государства), что является движущим фактором формирования уникальных инновационных бизнес-моделей на

цифровой базе как основной стратегии эффективного управления ВХК. Примером успешной реализации такого рода циркулярных бизнес-моделей в гидроэнергетике является совместный проект государства и частного бизнеса «Вода Ростова»[1].

Реализация перехода ВХК к новым индустриальным формам на основе инновационного развития устойчивых бизнес-моделей циркулярного типа приобретает особое значение в современных реалиях, когда гидроэнергетика, выступая компонентом и динамическим профилем индустриального ландшафта региона [6–8], обладает ключевой ролью в пространственно-экономической трансформации и структурной модернизации региональных экономик, определяет и в значительной степени формирует потенциал указанного перехода [9–13] в рамках стратегического вектора на достижение технологического лидерства и технологического суверенитета. Важной особенностью такого рода бизнес-моделей, реализуемых в ВХК региона, является их ориентированность на рациональное распределение ограниченных водных ресурсов территории между потребителями в целях, с одной стороны, полного удовлетворения их потребностей в воде, с другой – достижения сбалансированного инновационного развития промышленного комплекса. Успешность проводимых реформ в водном хозяйстве страны и ее регионов во многом определяется качеством принимаемых на цифровой платформе управленческих решений, обеспечивающих генерирование значимых позитивных эффектов на всех уровнях управления. В настоящее время именно концепция «цифровой достаточности» процессов принятия управленческих решений обеспечивает основу для понимания того, как информационные технологии могут быть частью значительных достижений в экономике замкнутого цикла, особенно когда они используются бизнес-компаниями. Более того, эффективная реализация ресурсов замкнутого цикла стала возможной с развитием цифровых технологий производства [14, 15].

При этом данные решения должны учитывать разнонаправленные интересы (экономические, политические, социальные) субъектов рынка водных ресурсов, которые находятся в постоянном взаимодействии между собой и с внешней средой (рис. 1).

Сложность задачи обеспечения баланса интересов субъектов гидроэнергетики как инфраструктуры, стимулирующей инновационные процессы в индустриальном секторе региона, объясняется, помимо их противоречивости и разнонаправленности, тем, что сложные нелинейные связи между акторами водохозяйственного комплекса региона продуцируют уникальные статистические паттерны взаимодействий между ними, которые, как показывает прак-

1 Водоканал. Ростов-на-Дону. [Электр. ресурс]. URL: https://vodokanalrnd.ru/press-tsentr/news/rostovskiy-vodokanal-stroit-vazhnyy-dlya-ekologii-regiona-obekt-kompleks-sooruzheniy-povtornogo-ispo/ (дата обращения: 16.01.2025).

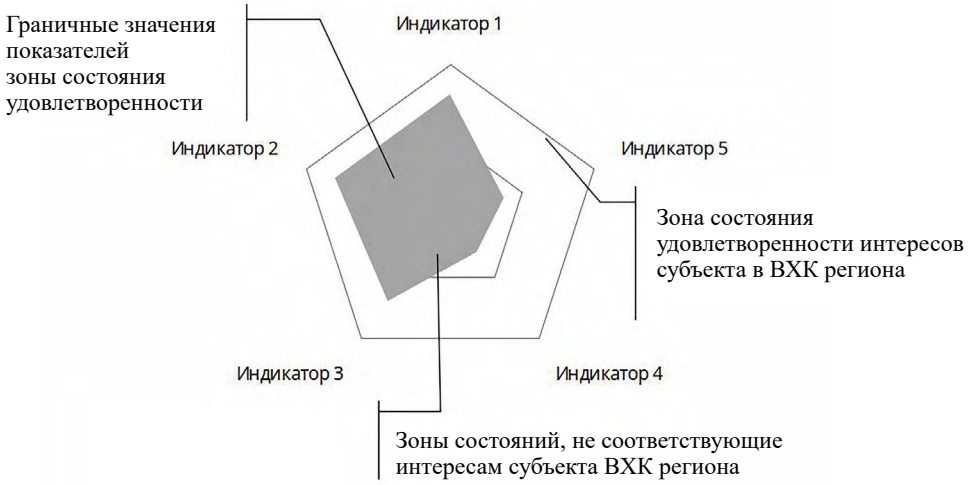


Рис. 1. Паутинообразная модель зонирования профиля интересов субъектов водохозяйственного комплекса региона [13]

Fig. 1. Web-like model of zoning the profile of interests of stakeholders of the regional water management complex [13]

тика, могут быть установлены с использованием современного адаптивного инструментария, в частности методов машинного обучения. Принимаемые на этой основе решения могут способствовать формулированию уникальных управленческих предложений, результативность которых в существенной мере зависит от качества и квалификации лиц, осуществляющих эти действия.

На заседании Государственного совета 25 декабря 2025 года, посвященном вопросам подготовки кадров для экономики РФ, Президент России В. В. Путин отметил, что мы переходим ко времени колоссальной экономической трансформации; ближайшие несколько лет станут временем технологического прорыва, который важен для страны[2], поскольку необходимо значительное повышение доли высокотехнологичной и наукоемкой продукции в общем объеме производства, которая сейчас составляет в целом по России около 17 % (в Москве – 27 %, в Ростовской области – менее 19 %, в большой части регионов – менее 10 %). Так, по результатам аналитических исследований последних лет, «Южный федеральный округ по большинству показателей (за исключением уровня инновационной активности организаций) отстает от других макрорегионов страны. В большей степени это связано с тем, что позитивные значения и тренды ряда показателей Ростовской области и Краснодарского края, лидирующих по инновационному развитию в ЮФО, нивелируются низкими значениями других регионов, занимающих замыкающие позиции в РФ. Это свидетельствует о том, что, во-первых, для отстающих регионов требуется поиск новых механизмов активизации инноваций, поскольку действую-

2 Из выступления В.В. Путина на заседании Государственного совета 25 декабря 2025 года [Электр. ресурс]. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/78860/videos.

щая система инструментов и институтов поддержки не дала существенных позитивных результатов; во-вторых, инновационную политику в целом целесообразно адаптировать к специфике инновационного развития регионов юга России, учитывая достигнутые результаты» [16].

В то же время, как правило, каждая программа направлена на решение отдельных текущих проблем (ликвидацию «узких мест») инновационного развития отрасли или региона, тогда как основная задача заключается в том, чтобы совокупность реализуемых программ обеспечивала изменение всей системы отношений в гидроэнергетике (как внутренних, так и внешних), позволяя способствовать эффективной реализации целей и задач, поставленных в новой модели ускоренного высокотехнологичного развития российской экономики. Решение перечисленных проблем видится в формировании комплекса целевых программ, взаимоувязанных, согласованных и структурированных по стратегическим целям и задачам развития региона, его индустриального ландшафта и водохозяйственного комплекса. При этом важным принципом должна быть «возможность формирования набора программ развития водного хозяйства региона в соответствии с региональными особенностями и потенциалом водного бассейна» [16].

По мнению авторов, в данном контексте методологический и практический интерес представляет в том числе региональная структура производства в разрезе уровней технологичности преобладающих видов экономической деятельности, определяющих скорость индустриальных изменений в регионе и в его ВХК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Присущая гидроэнергетике сложная иерархия взаимодействий между субъектами водного хозяйства региона, отражающих не только специфику самого ВХК как важного элемента индустриального ландшафта, но также применяемых механизмов и инструментов управления (рис. 2), формирует специфические совокупности характеристик субъектов ВХК, позволяющие идентифицировать уникальные свойства используемого для принятия решений инструментария, в составе которого большое распространение получают сквозные цифровые технологии.

Исследование этих и других сопряженных с рассматриваемой проблематикой вопросов базируется на совокупности и совместном использовании ряда общеметодологических и специфических методов и приемов. Базовым методологическим приемом выступает системно-синергетический подход, в соответствии с которым индустриальный ландшафт региона идентифицируется как сложная система, в состав которой входит, наряду с другими промышленными сферами, гидроэнергетика и ее структурно-функциональные подсисте-

мы, в т. ч. ВХК, а связи между этими элементами синергетическим образом продуцируют эффекты во внутренней и внешней среде ландшафта и региона в целом как суперсистемы. При изучении вложенности понятий «индустриальный ландшафт», «гидроэнергетика» и «водохозяйственный комплекс» региона использовались основные положения новой экономической географии, ландшафтоведения и эволюционной экономики, адаптированные к условиям высокой экономической нестабильности.

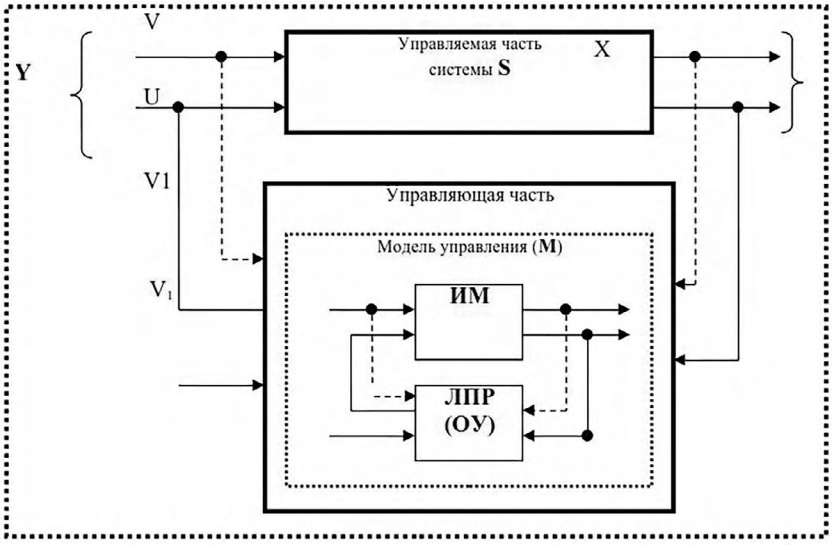


Рис. 2. Примерная модель системы управления ВХК региона [13]

Fig. 2. Approximate model of the region's WMC (water management complex) control system [13]

Примечание: S – система управления ВХК, X – водные ресурсы региона (вход), Y – распределенные водные ресурсы региона после реализации инкрементальной модели управления (выход), ИМ – инкрементальная модель управления; часть системы – управляемая часть – подлежит управлению U, а часть системы является управляющей, которая вырабатывает это управление (ЛПР – лицо, принимающее решение (или ОУ – орган управления)) в условиях, когда могут быть неконтролируемые воздействия на систему V и V_1. В общей схеме управления отображены прямые и обратные связи.

Note: S – WMC control system; X – region's water resources (input); Y – distributed regional water resources after implementation of the incremental management model (output); IM – incremental management model; part of the system – the controlled part – is subject to control U, and part of the system is the controlling part, which generates that control (DMP – decision-making person or OM – governing body) under conditions when there may be uncontrollable impacts on the system V and V1. The overall control scheme shows both forward and feedback links.

Для разработки модельно-методического инструментария оценки потенциала перехода региональной гидроэнергетической системы к новым индустриальным моделям и бизнес-моделям замкнутого цикла задействовано комплиментарное использование совокупности традиционных и относительно новых методов, в числе которых машинное обучение, деревья решений (ансамблевый бустинг), экономико-математическое моделирование, алгоритм COMAC, нейронные сети, модели каузального машинного обучения, многоагентное обу-

чение с подкреплением. Эти группы инструментов имеют достаточно общий характер и применимы для анализа региональных пространственных данных. Деревья решений также помогают проследить каузальные связи между региональными факторами и экономическими результатами.

В основе концепции данного исследования лежит идея о том, что последовательный, целеориентированный на более рациональное использование водных ресурсов региона переход гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям возможен на базе цифровизации и при использовании инновационных бизнес-моделей замкнутого цикла.

Бизнес-модели замкнутого цикла (БМЗЦ) в гидроэнергетике, как и в других сферах, представляют собой модели ведения хозяйственной деятельности, основанные на принципах циркулярной экономики [17–19]. В отличие от традиционной линейной модели «взял – произвел – использовал – выбросил», циркулярная модель в системе водного хозяйства региона предполагает многооборотное использование водных ресурсов и их производных. Основная идея – максимальное продление жизненного цикла водных ресурсов, повторное использование воды и минимизация отходов. Такая «безотходная» экономика в гидроэнергетике нацелена на сокращение потребности в первичных водных ресурсах, что одновременно снижает издержки производства и частично решает проблему объективно существующего дефицита данного вида ресурсов. По сути, отходы одного процесса должны становиться сырьем для другого, формируя замкнутые циклы производства и потребления. Подобный подход не только снижает нагрузку на окружающую среду, но и способствует появлению новых экономических возможностей: например, локальные циклы переработки использованной воды создают рабочие места и стимулируют развитие малого и среднего бизнеса.

Механизмы перехода к БМЗЦ в гидроэнергетике включают преобразование цепочек поставок водных ресурсов, технологий их переработки (в т. ч. очистки) и оборота, а также бизнес-процессов таким образом, чтобы обеспечить замкнутость потоков воды и энергии. В рамках стратегии перехода обычно реализуется принцип «3R» (reduce, reuse, recycle – сокращение потребления, повторное использование, переработка). На практике это требует внедрения целого ряда инноваций: от обратной логистики (возврата и переработки отработанной воды) до создания промышленных экосистем в рамках индустриального ландшафта региона, где предприятия обмениваются побочными продуктами производства. Например, промышленный симбиоз позволяет одному предприятию использовать те водные ресурсы, которые для другого являются отходами, – таким образом формируется межотраслевая замкнутая цепочка. Инновационные БМЗЦ предполагают и новые подходы к дизайну продуктов переработки воды, и внедрение обратных каналов сбора и утилизации, и переосмысление отношения потребителей к проблеме рационального водопользования.

Цифровизация как общесистемная парадигма БМЗЦ и современные технологии играют особую роль в становлении инновационных бизнес-моделей замкнутого цикла в гидроэнергетике [20, 21]. Концепция Индустрии 4.0 – интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект, блокчейн и др. – предоставляет лицам, принимающим решения, инструменты для оптимизации материальных потоков и замыкания циклов. Зарубежный опыт показывает тесную связь между цифровыми технологиями и циркулярными моделями бизнеса. Например, с помощью датчиков и IoT можно отслеживать движение воды по всей цепочке – от добычи водных ресурсов до утилизации – и тем самым эффективно организовать их возврат в производство. Цифровая трансформация применяемых в гидроэнергетике бизнес-моделей способствует переходу от массового (зачастую неэффективного) потребления воды к более рациональным моделям: развитию совместного пользования водными ресурсами, сервисных моделей и пр. Отдельно следует отметить большой потенциал искусственного интеллекта в управлении сложными энергосистемами: AI может прогнозировать спрос и оптимизировать генерацию и хранение воды, снижая как ее потери, так и излишки. Уже сегодня умные сети и аналитические системы позволяют, например, сокращать потери воды в коммунальном хозяйстве на 25–30 % за счет более точного учета и управления потоками. Таким образом, цифровизация выступает мощным драйвером для реализации принципов замкнутого цикла в гидроэнергетике на практике, хотя ее потенциал еще не использован полностью и требует дальнейших исследований.

В контексте исследования проблематики применения замкнутых бизнес-моделей на этапах производства, распределения, потребления и утилизации воды следует дополнительно отметить, что гидроэнергетика – одна из ключевых отраслей для внедрения принципов циркулярной экономики, поскольку именно в энергетических цепочках циркуляция воды и замкнутые циклы могут существенно повысить общую эффективность водохозяйственных систем и их экологичность. Рассмотрим, как принципы БМЗЦ находят применение на разных стадиях – от производства воды необходимого качества до ее потребления и утилизации.

На стадии *генерации* водных ресурсов переход к замкнутым моделям выражается прежде всего в замене невозобновляемых видов ресурсов возобновляемыми и в вовлечении вторичных водных ресурсов в производственный оборот. Вместо переработки воды, извлекаемой из исчерпаемых источников водных ресурсов, циркулярная модель предполагает опору на повторное вовлечение в производственный процесс использованной воды. В российских условиях именно развитие возобновляемых источников (в частности, гидроэнергетики) рассматривается как один из перспективных векторов циркулярной экономики, поскольку эти источники возобновляются естественным путем и фактически образуют замкнутый цикл в масштабе биосферы (кру-

говорот воды). Использование возобновляемых источников сокращает «вход» невозобновляемых ресурсов в производственный цикл и снижает образование вредных отходов при использовании воды.

Помимо возобновляемых источников водных ресурсов, замкнутая модель поощряет использование побочных продуктов и отходов от потребления воды в других отраслях. В результате решаются три задачи: утилизируются отходы, происходит уменьшение нагрузки на экологию и одновременно генерируется полезная энергия (принцип waste-to-energy).

Еще один аспект – вторичные водные ресурсы в промышленности. Многие промышленные отрасли используют воду в своем производстве, что в циркулярной модели рассматривается как ценный вторичный ресурс. Примером является создание замкнутых циклов водоснабжения, где сточные воды проходят очистку и возвращаются в производство для охлаждения, промывки или технологических нужд. Это минимизирует забор пресной воды и сброс отходов, используя методы механической, биологической и мембранной очистки[3].

К числу основных способов вторичного использования воды относятся следующие:

1. Оборотные системы охлаждения, в которых вода постоянно циркулирует, проходя через градирни, что является наиболее часто применяемым на практике методом охлаждения воды и используется на электростанциях, нефтеперерабатывающих заводах и на других предприятиях, где требуется охлажденная вода.

2. Различные технологические циклы, где необходима очищенная вода, которая используется для промывки сырья, деталей, промежуточных изделий, а также для очистки газов и в красильных цехах, где требуется чистая вода.

3. Так называемые промышленные бани. В соответствии с этим способом вторичного использования вода после очистки возвращается в ванны для обработки различных изделий (например, при катафорезе).

4. Бессточные системы (ZLD), реализующие технологию «нулевого жидкого сброса», в которой используется испарение и осуществляется кристаллизация для возврата 100 % воды.

Для повторного использования воды применяются различные технологии очистки, в числе которых: механические (решетки, песколовки, ультрафильтрация); химические и физико-химические (коагуляция, флокуляция); мембранные (обратный осмос, нанофильтрация); биологические (аэротенки и мембранные биореакторы).

Применение циркулярных бизнес-моделей или замкнутых систем (например, сгустителей) позволяет возвращать до 90 % технической воды, снижая

3 Пять идей для повторного использования воды для бизнеса. [Электр. ресурс]. URL: https://rudesignshop.ru/blog/5-idey-dlya-povtornoe-ispolzovanie-vody-dlya-biznesa.

экологическую нагрузку на внешнюю среду и экономические затраты предприятий. Примером эффективного повторного использования воды в промышленности является производство синтетического каучука, а также готовой продукции на целлюлозно-бумажных производственных объектах, где активно внедряются современные системы очистки. Таким образом, в промышленных процессах множество операций требует повторного использования воды, в т. ч. на базе цифровизации, в результате вторичного вовлечения сточных вод посредством применения термических методов обработки жидких отходов до чистой воды (дистиллята) и твердого отхода[3].

Этап *распределения водных ресурсов* (транспортировка, хранение воды) также претерпевает изменения под влиянием циркулярных подходов. Традиционные системы транспортировки воды были ориентированы на однонаправленный поток «от производителя к потребителю», при котором избыточная вода теряется, а потребители пассивны. Инновационные бизнес-модели предполагают гибкие интеллектуальные сети с двусторонним движением воды и информационными потоками.

Интеллектуальные сети доставки воды потребителям оснащены датчиками, смарт-счетчиками и системами управления в реальном времени, что позволяет значительно снизить потери при ее транспортировке и распределении. Например, утечки в сетях водоснабжения удается сократить на 25–30 % благодаря интеллектуальному учету и анализу данных. Цифровые системы управления оптимизируют нагрузку на транспортные сети, переключают потоки так, чтобы минимизировать перегрузки и холостые потери. Благодаря этому вода циркулирует без излишних потерь, что является реализацией принципа ресурсной эффективности циркулярной экономики. Кроме того, развиваются системы накопления воды (фермы, гидроаккумулирующие станции и др.), которые позволяют аккумулировать избыточную воду в период низкого спроса и возвращать ее в сеть в часы пик. Это создает замкнутый цикл внутрисуточного или сезонного баланса: вода возвращается в оборот при необходимости.

На этапе *потребления воды* принципы замкнутого цикла проявляются через изменение поведения потребителей и появление новых моделей удовлетворения потребностей в воде. Цель – рациональное водопотребление с минимальными потерями и отходами, что подразумевает бóльшую эффективность и многократное использование воды, т. е. соответствие стратегии общеэкономической ресурсоэффективности.

Один из ключевых подходов – повышение эффективности конечного использования водных ресурсов. Это своего рода «невидимый» замкнутый цикл: сэкономленная вода эквивалентна произведенной. За счет внедрения инновационных бизнес-моделей и технологий умного производства удается высвободить часть воды, которая возвращается в промышленный оборот (в виде сниженной потребности в генерации). Такие бизнес-модели совмещают интересы

потребителя (уменьшение расходов на воду) и поставщика воды, стимулируя бережливое отношение к ней.

Стадия *утилизации* в гидроэнергетике охватывает утилизацию отходов, возникающих в процессе производства и потребления воды, а также вывод из эксплуатации устаревшего оборудования. В линейной модели на этом этапе ценный водный потенциал часто терялся: отходы воды отправлялись на свалку, старые установки демонтировались на металлолом. В замкнутой модели есть возможность максимальной переработки и повторного использования воды на этом завершающем этапе циркулярной бизнес-модели, чтобы замкнуть цикл полностью. Иными словами, циркулярный подход подразумевает, что все остаточные продукты промышленного водопользования должны становиться вторичным ресурсом для новых циклов.

Таким образом, переход к инновационным бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике является важным направлением прогресса в условиях цифровой экономики и ориентации на устойчивое развитие. Бизнес-модели замкнутого цикла предлагают системный подход к ведению энергетического бизнеса, при котором достигается многократное использование водных ресурсов, минимизация отходов и синергия между участниками экономической деятельности. По мнению Yan Zh. «...благодаря инновациям в бизнес-моделях цифровизация способствует интеграции существующих ресурсов, оптимизации бизнес-процессов, повышению эффективности деятельности и устранению отраслевых барьеров. Это позволяет компаниям формировать дифференцированные конкурентные преимущества и потенциально изменять конкурентный ландшафт в условиях усиливающейся рыночной конкуренции в цифровую эпоху» [22]. Такие модели отвечают глобальным целям – обеспечению доступной чистой воды, ответственному потреблению и борьбе с климатическими изменениями – и одновременно способны повысить конкурентоспособность и инновационность компаний – субъектов водохозяйственных комплексов регионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущем разделе были рассмотрены важнейшие физические элементы инфраструктуры ВХК, обеспечивающие его переход к новым индустриальным моделям. В данном разделе описывается цифровой уровень указанного перехода: алгоритмы ИИ и машинного обучения, которые обеспечивают успешное принятие решений в управлении ВХК региона.

Для координации экономической деятельности агентов регионального ВХК требуется поиск оптимальных параметров сразу по двум уровням: каждый автономный агент ВХК региона должен оптимизировать свои локальные процессы (сброс и забор воды, ее очистку, переработку, повторное использо-

вание и пр.). В то же время для достижения устойчивости всей системы ВХК региона требуется нахождение глобального оптимума (минимизация энергопотребления, общего количества отходов, эксплуатационных расходов). Таким образом, устойчивая работа ВХК региона подразумевает решение экономической оптимизационной задачи в условиях экстерналий.

Одним из перспективных решений данной проблемы является многоагентное обучение с подкреплением – Multi-Agent Reinforcement Learning, или MARL [23]. Каждое предприятие ВХК становится в данной модели автономным агентом, который имеет свою локальную функцию оптимизации в условиях некоторых ограничений (например, минимизация затрат на очистку воды при соблюдении строгих экологических нормативов). Вместе с тем модель должна определять глобальную цель всей системы ВХК региона. К такой цели может относиться минимизация общего сброса отходов в регионе. Спайкой между двумя задачами оптимизации выступает особая структура вознаграждения множества автономных агентов ВХК. К примеру, нарушение общерегиональных экологических норм может иметь для агента больший штрафной вес, чем неэффективности локального уровня. Таким образом, на основе балансировки интересов предприятий и всей системы методом проб и ошибок после множества итераций модели достигается общее оптимальное состояние регионального ВХК.

В реальных инженерных системах целесообразно строить MARL-архитектуру на основе федеративного обучения, в котором каждое предприятие обучает только часть модели на основе локальных данных, а с внешней средой обменивается лишь результатами обучения. В рамках индустриального симбиоза предприятий региона данная архитектура позволяет оптимизировать поток ресурсов между ними, соблюдая при этом конфиденциальность их данных.

Если моделирование MARL касалось симуляционных и «калибровочных» процессов в управлении ВХК региона, то интерпретируемый ИИ (XAI) является иной формой поддержки управленческих решений. Используя наблюдения о хозяйственных процессах на местных предприятиях ВХК, управленцы могут задействовать модели XAI для более детального анализа предиктивных моделей водопользования [24–26]. В частности, использование SHAP вместе с регрессионными моделями позволяет объяснить прогноз как по любой точке данных, так и глобально, по признакам всего набора данных. К примеру, модельный ансамбль SHAP + XGBoost позволяет количественно установить вклад климата, структуры промышленности, демографии и других факторов в предсказание «выхода» модели (например, дефицит водных ресурсов региона). Нужно помнить о том, что ни SHAP (или его аналоги), ни регрессии деревьями решений не позволяют установить причинно-следственные связи. Данные методы сильно зависят от вариации признаков в наборе данных, что

обеспечивает крайне эффективный способ анализа предиктивной, но не каузальной силы факторов модели.

Каузальные оценки могут быть получены благодаря моделям каузального машинного обучения [27]. Благодаря особой структуре данных моделей, которая ортогонализирует получаемые оценки (это релевантно в отношении, например, двойного машинного обучения), становится возможным выделить чистый эффект влияния того или иного фактора на целевую переменную. Каузальное машинное обучение превосходит традиционные эконометрические методы за счет возможности точной оценки нелинейных взаимодействий между факторами. Таким образом, становится возможным оценить на самом мельчайшем, гранулированном уровне эффективность субсидий для предприятий ВХК, критические точки в потоках внутри индустриального симбиоза, причины и следствия внутри цифровых двойников предприятий ВХК. Каузальные модели машинного обучения обеспечивают информированную поддержку управленческих решений, которая основывается не на корреляциях, а на реальных причинно-следственных связях.

Далее предлагается формальная математическая модель многоагентного обучения с подкреплением, которая выполняет функцию поиска компромиссных стратегий взаимодействия агентов ВХК в условиях необходимости развития циркулярных моделей и учета конфликтов интересов хозяйствующих субъектов региона. Представленная формализация выполняет роль прототипа для дальнейшей апробации на реальных данных.

Формализация модели начинается с описания пространства состояний глобальной среды, в которой действуют разнородные агенты, входящие в состав водохозяйственного комплекса региона.

Глобальная среда. Пусть имеется пространство состояний водного бассейна региона S. В данном пространстве конкретное состояние моделируемой среды на момент t описывается кортежем гидрологических параметров:

$$s_t = (h_t, c_t, p_t) \in S,$$

где h_t – вектор уровней воды в бассейне региона;

c_t – вектор мощностей по обработке воды в системе ВХК;

p_t – вектор цен на воду.

Пусть общее количество водных ресурсов региона в момент t характеризуется переменной W_t.

Представленные параметры обновляются каждый шаг итерации модели по определенным предзаданным гидрологическим (f_h) и экономическим (f_d) траекториям с поправкой на стохастические экзогенные шоки случайного характера. Вектор мощностей по обработке воды также изменяется на каждом шаге модели в момент t в зависимости от инвестиций c_{inv} агента i в прошлом

периоде $t - 1$, т. е. общие мощности по обработке находятся в зависимости от инвестиций агентов в циркулярную инфраструктуру ВХК.

Агенты и их действия. В составе ВХК региона существует множество агентов $A = \{1, \ldots, N\}$. Каждый агент представляет определенного участника ВХК (предприятия-производители водных ресурсов, предприятия-потребители воды (промышленность, сельское хозяйство, организации ЖКХ и другие), а также государство как макрорегулятора).

Агент i в момент t делает некоторый выбор a_{ti} из множества доступных для него альтернатив U_i. Выбор a_{ti} представляет из себя кортеж:

$$a_{ti} = (u_{ti}^{ex}, u_{ti}^{recyc}, p_{ti}, c_{ti}),$$

где u^{ex}_{ti} – забор воды агента i в момент t (определяется экзогенно по отношению к модели как доля α_i от общих водных ресурсов региона W);

u^{recyc}_{ti} – сброс очищенной воды агента i в момент t;

p_{ti} – цена единицы воды, по которой агент i может покупать или продавать воду (определяется экзогенно по отношению к модели);

c_{ti} – инвестиции в циркулярную инфраструктуру ВХК региона.

О состояниях S агенты имеют свои наблюдения o_{ti}, которые являются частичным «срезом» векторов s_{ti}.

Структура вознаграждения. Каждый агент i в момент t балансирует свою необходимость зарабатывать прибыль, соответствовать экологическим нормам и переходить к циркулярным моделям.

Функция вознаграждения r_{ti} описывается тогда следующим образом:

$$r_{ti} = \Pi_{ti} - \lambda_i^{env} * \varphi_{ti} + \lambda_i^{cir} * \psi_{ti},$$

причем λ^{env} и λ^{cir} представляют собой поправочные весовые коэффициенты штрафов и вознаграждений для каждого агента i.

Необходимы следующие пояснения относительно функции вознаграждения:

- Π_{ti} – функция прибыли (или убытка) организации – агента ВХК, которая определяется как разница между выручкой агента в составе ВХК (если он продает излишки воды на региональном рынке) и его операционными расходами C^{op}, которые представляют собой функцию от u^{ex} и u^{recyc} агентов, а именно:

$$\Pi_{ti} = p_{ti} * u_{ti}^{ex} - C_{ti}^{op}(u_{ti}^{ex}, u_{ti}^{recyc});$$

- функция штрафа за нарушение экологических регуляторных норм (L^{reg} выступает константой допустимого забора воды в регионе) представляет собой оператор максимум из нуля и разницы между забором и нормой забора и рассчитывается следующим образом:

$$\phi_{ti} = \max (0, \sum_{j \in N} u_{tj}^{ex} - L_t^{reg});$$

- функция бонуса за циркулярность с индивидуальным для агента *i* весовым коэффициентом β_i можно представить так:

$$\psi_{ti} = \beta_i * u_{ti}^{recyc}.$$

Целевая функция модели. Агенты максимизируют дисконтированную функцию кумулятивных выигрышей:

$$\max_{\Xi} = E [\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_{ti} \mid \Xi_i], \gamma \in (0,1),$$

где Ξ – функция, ставящая в соответствие наблюдения актора *i* и его действий;

r_{ti} – функция вознаграждения агента *i*;

γ – коэффициент дисконтирования.

Обучение модели. Пусть имеется сеть акторов $\mu_{\theta i}(o_{ti})$, которая ставит в соответствие наблюдения акторов и непрерывные векторы действий a_{ti}. Также имеется сеть критики $Q_{\varphi i}(s_t, a_t, a_t^{-i})$, которая для каждого агента оценивает пары (действия – состояния среды) с учетом действий других акторов a_{t-i} и полной информации о глобальной среде. Акторы, имея неполную информацию о внешней среде, предпринимают свои действия. Критик, имея полную информацию о текущем состоянии среды, выдает числовую оценку будущего состояния среды (*Q*-value), после чего агенты корректируют свои действия на следующем этапе, чтобы минимизировать ошибку между оценкой критика и реальным значением таргета. Цикличная корректировка параметров действий агентов с целью максимизации оценки критика и есть обучение модели по алгоритму COMAC [28].

Отметим, что в данной модели вода рассматривается как обмениваемый на региональном рынке товар, а агенты – как максимизирующие свою прибыль автономные субъекты. Отсюда следует, что модель абстрагируется от логики конечного производства и концентрируется не на конечном производстве, а конкретно на рынке водных ресурсов, т. е. на выручке от реализации собственно забранной воды за вычетом операционных издержек на очистку, транспортировку и пр.

Используя алгоритм COMAC (Cooperative-Competitive Multi-Agent Actor-Critic) и алгоритм градиентного спуска, можно путем оптимизации целевой функции модели установить для акторов:

1) точные параметры их перехода от ограниченной информации к конкретным индивидуальным управленческим действиям;

2) оптимальные гиперпараметры структуры штрафов региональной системы (λ^{env} и λ^{cir}) для каждого агента ВХК;

3) политические рекомендации (индивидуальные бонусы за циркулярность или экологические штрафы);

4) общее благосостояние ВХК региональной системы (сумма функций вознаграждений агентов в оптимальном состоянии).

Таким образом, разработанная авторами модель является адаптивным инструментом поддержки принятия оптимальных управленческих решений в рамках регионального ВХК по целому спектру специфических, свойственных именно водохозяйственной системе, направлений.

ВЫВОДЫ

Результаты анализа широкого спектра современных публикаций об основных и хорошо известных в научном дискурсе факторах перехода системообразующих отраслей региона (в числе которых гидроэнергетика и ее часть – ВХК) к новым индустриальным моделям подтвердили ключевую роль в этих процессах циркулярности на базе цифровизации. Исходя из того, что для компаний ВХК является ключевой задачей обеспечение полного удовлетворения потребностей в водных ресурсах с одновременным решением проблемы их эффективного использования, в проведенном исследовании осуществлено обоснование того, что нацеленный на рациональное водопотребление переход гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям возможен исключительно на базе цифровизации и применения инновационных бизнес-моделей замкнутого цикла, поскольку это означает реальную возможность согласованного решения указанных вопросов. То есть не только предложение потребителям воды требуемого качества и предоставление соответствующих услуг за счет применения цифровых технологий, но и оптимизацию процесса управления всем жизненным циклом водных ресурсов.

Построенная теоретическая рамка и концептуализация основных положений механизма поиска компромиссных стратегий взаимодействия агентов ВХК и учета конфликтов их интересов в рамках моделей замкнутого цикла позволили получить целый ряд теоретических и практико-прикладных результатов:

– проведена систематизация цифровых бизнес-моделей замкнутого типа компаний ВХК, учитывающих их специфику;

– уточнены концептуальные представления о сущности и механизмах развития новых бизнес-моделей субъектов ВХК на базе цифровизации;

– осуществлено развитие теории цифровых бизнес-моделей применительно к субъектам ВХК региона на основе интегрированной концепции, сочетающей теорию динамических способностей, теорию цифрового потенциала, теорию циркулярности и теорию диффузии инноваций, что позволило разработать оригинальный методологический подход для оценки влияния цифровизации на устойчивость бизнес-модели;

– определены ключевые элементы новых циркулярных бизнес-моделей применительно ко всем этапам жизненного цикла водных ресурсов в логике адаптивного развития данных моделей, обусловленного цифровыми технологиями;

– обосновано, что механизмы перехода к бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике в условиях современных турбулентностей внешней среды включают не только преобразование цепочек поставок водных ресурсов, но и технологий их переработки (в том числе очистки) и оборота, а также собственно бизнес-процессов таким образом, чтобы обеспечить замкнутость потоков воды и энергии, что во многом достигается благодаря высокому качеству партнерских взаимодействий участников ВХК;

– бизнес-модели замкнутого цикла предлагают системный подход к ведению энергетического бизнеса, при котором достигаются многократное использование водных ресурсов, минимизация отходов и синергия между участниками экономической деятельности.

В соответствии с этим получен вывод, что переход к инновационным бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике является важным направлением развития в условиях цифровой экономики и ориентации на ее устойчивое и резильентное развитие. Такие модели отвечают глобальным целям – обеспечению доступности чистой воды, ее ответственному потреблению и борьбе с климатическими изменениями – и одновременно способны повысить конкурентоспособность и инновационность компаний – субъектов ВХК регионов.

В исследовании показано, что гармонизация интересов разнородных агентов индустриального ландшафта региона, в т. ч. водохозяйственных систем, может быть осуществлена с помощью передовых методов машинного обучения. В частности, предложенная в статье модель многоагентного обучения с подкреплением (MARL) является прототипом для построения более сложных моделей, которые могут быть использованы для принятия не только экономических, экологических, но и политических решений.

Более детализированное (гранулированное) моделирование процесса столкновения интересов участников ВХК и разрешения конфликтов между ними позволит точнее калибровать систему штрафов и вознаграждений, которая стимулировала бы переход к новым индустриальным моделям. Однако результаты моделирования MARL должны дополнительно подтверждаться эмпирическими каузальными исследованиями (например, с помощью каузального машинного обучения) для формирования многоуровневой системы кросс-валидации моделей, что может стать направлением дальнейших исследований в данной области. В таком случае эмпирические оценки направляли бы логику симуляционного моделирования, а сложные симуляции становились полигоном апробации сложных политических программ циркуляризации ВХК региона. Такой сложный модельный комплекс (ансамбль) стал бы важным поддерживающим элементом процесса перехода ВХК регионов к новым индустриальным моделям.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриднев Д. С. От «глобализирующихся регионов» к региональным производственным системам: теория множественных индустриальных моделей // Экономическая наука современной России. 2026. № 2. [В печати].
2. Митрофанова И. В., Чернова О. А. Проблемы и перспективы развития циркулярной экономики на основе повторного водопользования в регионах Южного федерального округа РФ // Теория и практика общественного развития. 2022. № 4 (170). С. 55–61. https://doi.org/10.24158/tipor.2022.4.8
3. Матвеева Л. Г. Цифровые и циркулярные меридианы развития водного хозяйства региона: монография. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2024. 155 с. https://doi.org/10.18522/801332158
4. Колпоносова В. С., Матвеева Л. Г. Циркулярный концепт развития индустриального сектора регионов юга России в условиях новой глобализации (пример водных экосистем) // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 2 (58). С. 296–300.
5. Кузьмичев А. А., Рыжаков А. Н., Мартынов Д. В. Анализ дефицита водных ресурсов и использования мелиорированных земель в Южном федеральном округе // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11. № 3. С. 19–35. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35
6. Косолапова Н. А., Матвеева Л. Г., Каплюк Е. В. Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25
7. Krupina N. N. Water intensity of the social product as a target landmark of the Russian water strategy (regional aspect) // Regional Economy. Theory and Practice. 2017. Vol. 15. Iss. 6. P. 1016–1033. https://doi.org/10.24891/re.15.6.1016
8. Висмет Х. Системные преобразования для бизнеса в контексте перехода к экономике замкнутого цикла // Форсайт. 2020. № 4. С. 47–50. https://doi.org/10.17323/2500-2597.2020.4.47.60
9. Давиденко Л. М., Беспалый С. В., Бекниязова Д. С. Ресурсная парадигма построения промышленной экосистемы цифрового формата // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2020. № 1 (80). С. 58–68. https://doi.org/10.21295/2223-5639-2020-1-58-68
10. Каплюк Е. В., Низов Н. В. Бизнес-модели циркулярной экономики и цифровые технологии в инновационном развитии промышленности // Вестник академии знаний. 2022. № 50 (3). С. 127–134.
11. Косолапова Н. А. и др. Модели циркулярной экономики в ресурсообеспечении индустриального развития регионов // Terra Economicus. 2022. Т. 20. № 3. С. 116–132. https://doi.org/10.18522/2073-6606-2022-20-3-116-132
12. Bacovis M. M. C., Borchardt M. Assessing the Influence of Circular Economy Practices in Companies that Orchestrate an Ecosystem of a Brazilian Industrial Cluster // Industrial Engineering and Operations Management. 2021. [Электр. ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-78570-3_2
13. Assessment of water resources use efficiency based on the Russian Federation's gross regional product water intensity indicator / L. G. Matveyeva, O. A. Chernova, N. A. Kosolapova, A. E. Kosolapov // Regional Statistics. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 154–169. https://doi.org/10.15196/RS080201

14. Akberdina V., Strielkowski W., Linder N., Kashirin S., Shmeleva L. Information Technology and Digital Sufficiency for Building the Sustainable Circular Economy // Energies. 2023. No. 16. Art. 1399. https://doi.org/10.3390/en16031399
15. Никитаева А. Ю., Чернова О. А., Долгова О. И. Концептуализация принятия решений по развитию циркулярной экономики в регионах российского Причерноморья // Региональная экономика. Юг России. 2022. Т. 10. № 4. С. 162–175. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2022.4.15
16. Никитаева А. Ю., Новикова А. Е. Эмпирический анализ инновационного развития регионов Юга России // Региональная экономика. Юг России. 2025. Т. 13. № 4. С. 143–156. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2025.4.13
17. Евдокимова А. А., Коновалов А. М., Батурова Г. В. Финансирование «синей» экономики: мировая и российская практика // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. № 2. С. 22–39. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).2
18. Рыбасова М. В., Серова Е. И. Цифровизация как движущая сила бизнес-моделей экономики замкнутого цикла // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6. С. 134–138. https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.6.16
19. Дроздова А. П., Молчанова С. М., Самойлов А. В. Бизнес-модели замкнутого цикла как современный подход к проблеме устойчивого развития экономики // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 2. № 11. С. 133–139. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2020.11.02.018
20. Макаренко Е. Д. Формирование инновационных бизнес-моделей в рамках перехода к экономике замкнутого цикла // Седьмой международный экономический симпозиум. Материалы. 2023. С. 197–201.
21. Калякина И. М. и др. Инновационное развитие бизнес-моделей в условиях круговой экономики с применением инструментов цифровизации // Альманах «Крым». 2021. № 25. С. 33–41.
22. Yan Zh. Research status and implementation path of digital business model innovation for industrial enterprises / Zh. Yan // Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-Economic Sciences. 2025. Vol. 18. No. 4. P. 103–112. https://doi.org/10.17213/2075-2067-2025-4-103-112
23. Jia L. & Pei Y. Recent Advances in Multi-Agent Reinforcement Learning for Intelligent Automation and Control of Water Environment Systems // Machines. 2025. Vol. No. 13 (6). Art. 503. https://doi.org/10.3390/machines13060503
24. Wagan S. M., Sidra S. Interpreting Irrigation Decisions: Explainable AI Using SHAP and LIME in Agricultural Water Management Models // Water Resources Management. 2026. Vol. 40. Art. 52. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04468-0
25. Mallick J., Alqadh, S., Alsubih M. et al. Automated interpretation of deep learning-based water quality assessment system for enhanced environmental management decisions // Applied Water Science. 2025. Vol. 15. Art. 110. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02452-y
26. Zounemat-Kermani M., Kheimi M. Explainable Artificial Intelligence in Hydrology: A Review // Water Resources Management. 2026. Vol. 40. Art. 106. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04435-9
27. Chernozhukov V., Hansen C., Kallu N., Spindler M., Syrgkanis V. Applied Causal Inference Powered by ML and AI. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02467
28. Lowe R. Wu, Y. I., Tamar A., Harb J., Pieter Abbeel O. & Mordatch I. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments // Advances in neural information processing systems. 2017. No. 30. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02275

REFERENCES

1. Gridnev D. S. From “globalizing regions” to regional production systems: the theory of multiple industrial models. *Economic science of modern Russia.* 2026. No. 2. [In press].

2. Mitrofanova I. V., Chernova O. A. Problems and prospects for the development of a circular economy based on repeated water use in the regions of the Southern Federal District of the Russian Federation. *Theory and practice of social development*. 2022. No. 4 (170). P. 55–61. https://doi.org/10.24158/tipor.2022.4.8
3. Matveyeva L. G. Digital and circular meridians of the development of water management in the region: monograph. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2024. 155 p. https://doi.org/10.18522/801332158
4. Kolponosova V. S., Matveyeva L. G. Circular concept for the development of the industrial sector of the regions of southern Russia in the context of new globalization (an example of aquatic ecosystems). *Natural and humanitarian research*. 2025. No. 2 (58). P. 296–300.
5. Kuzmichev A. A., Ryzhakov A. N., Martynov D. V. Analysis of water scarcity and the use of reclaimed land in the Southern Federal District. *Reclamation and hydraulic engineering*. 2021. Vol. 11. No. 3. P. 19–35. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35
6. Kosolapova N. A., Matveyeva L. G., Kaplyuk E. V. Strategic frontiers of the industrial landscape of the macroregion: case of water resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No 6. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25
7. Krupina N. N. Water intensity of the social product as a target landmark of the Russian water strategy (regional aspect). *Regional Economy. Theory and Practice*. 2017. Vol. 15. Iss. 6. P. 1016–1033. https://doi.org/10.24891/re.15.6.1016
8. Wismet H. Systemic transformations for business in the context of the transition to a circular economy. *Forsythe*. 2020. No. 4. P. 47–50. https://doi.org/10.17323/2500-2597.2020.4.47.60
9. Davidenko L. M., Bespaly S. V., Bekniyazova D. S. Resource paradigm for building an industrial ecosystem of the digital format. *Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*. 2020. No. 1 (80). P. 58–68. https://doi.org/10.21295/2223-5639-2020-1-58-68
10. Kaplyuk E. V., Nizov N. V. Business models of the circular economy and digital technologies in the innovative development of industry. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2022. No. 50 (3). P. 127–134.
11. Kosolapova N. A. et al. Models of a circular economy in resource supply of industrial development of regions. *Terra Economicus*. 2022. Vol. 20. No. 3. P. 116–132. https://doi.org/10.18522/2073-6606-2022-20-3-116-132
12. Bacovis M. M. C., Borchardt M. Assessing the Influence of Circular Economy Practices in Companies that Orchestrate an Ecosystem of a Brazilian Industrial Cluster. *Industrial Engineering and Operations Managemen*t. 2021. [Electronic resource]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-78570-3_2
13. Assessment of water resources use efficiency based on the Russian Federation's gross regional product water intensity indicator / L. G. Matveyeva, O. A. Chernova, N. A. Kosolapova, A. E. Kosolapov. *Regional Statistics*. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 154–169. https://doi.org/10.15196/RS080201. EDN: ZDGLYH
14. Akberdina V., Strielkowski W., Linder N., Kashirin S., Shmeleva L. Information Technology and Digital Sufficiency for Building the Sustainable Circular Economy *Energies*. 2023. No. 16. Art. 1399. https://doi.org/10.3390/en16031399
15. Nikitaeva A. Yu., Chernova O. A., Dolgova O. I. Conceptualization of decision-making on the development of a circular economy in the regions of the Russian Black Sea region. *Regional economy. South of Russia*. 2022. T. 10. No. 4. P. 162–175. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2022.4.15
16. Nikitaeva A. Yu., Novikova A. E. Empirical analysis of the innovative development of regions of the South of Russia. *Regional economy. South of Russia*. 2025. Vol. 13. No. 4. P. 143–156. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2025.4.13

17. Evdokimova A. A., Konovalov A. M., Baturova G. V. Financing of the “blue” economy: world and Russian practice. *Oceanologic research*. 2024. Vol. 52. No. 2. P. 22–39. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).2
18. Rybasova M. V., Serova E. I. Digitalization as a driving force of business models of a closed cycle economy. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2024. No. 6. P. 134–138. https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.6.16
19. Drozdova A. P., Molchanova S. M., Samoilov A. V. Business models of a closed cycle as a modern approach to the problem of sustainable economic development. *Economics and management: problems, solutions*. 2020. Vol. 2. No. 11. P. 133–139. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2020.11.02.018
20. Makarenko E. D. Formation of innovative business models in the framework of the transition to a circular economy. *Seventh International Economic Symposium*. *Proceedings*. 2023. P. 197–201.
21. Kalyakina I. M. *et al*. Innovative development of business models in a circular economy using digitalization tools. *Almanac “Crimea*”. 2021. No. 25. P. 33–41.
22. Yan Zh. Research status and implementation path of digital business model innovation for industrial enterprises / Zh. Yan. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-Economic Sciences.* 2025. Vol. 18. No. 4. P. 103–112. https://doi.org/10.17213/2075-2067-2025-4-103-112
23. Jia L., Pei Y. Recent Advances in Multi-Agent Reinforcement Learning for Intelligent Automation and Control of Water Environment Systems. *Machines.* 2025. No. 13 (6). Art. 503. https://doi.org/10.3390/machines13060503
24. Wagan S. M., Sidra S. Interpreting Irrigation Decisions: Explainable AI Using SHAP and LIME in Agricultural Water Management Models. *Water Resources Management.* 2026. Vol. 40. Art. 52. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04468-0
25. Mallick J., Alqadh S., Alsubih M. *et al*. Automated interpretation of deep learning-based water quality assessment system for enhanced environmental management decisions. *Applied Water Science.* 2025. Vol. 15 No. 110. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02452-y
26. Zounemat-Kermani M., Kheimi M. Explainable Artificial Intelligence in Hydrology: A Review. *Water Resources Management.* 2026. Vol. 40. Art. 106. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04435-9
27. Chernozhukov V., Hansen C., Kallu N., Spindler M., Syrgkanis V. Applied Causal Inference Powered by ML and AI. ArXiv. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02467
28. Lowe R. Wu, Y. I., Tamar A., Harb J., Pieter Abbeel O. & Mordatch I. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments. *Advances in neural information processing systems.* 2017. No. 30. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02275

Сведения об авторах:

Матвеева Людмила Григорьевна, д-р экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 88; https://orcid.org/0000-0002-7156-5856; e-mail: lmatveeva@sfedu.ru

Каплюк Екатерина Валерьевна, канд. экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22; https://orcid.org/0000-0001-5768-6486; e-mail: ekapluk@sfedu.ru

Гриднев Данил Сергеевич, канд. экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 88; https://orcid.org/0009-0004-1481-1258; e-mail: dgridnev14@gmail.com

About the authors:

Lyudmila G. Matveyeva, Doctor of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia; https://orcid.org/0000-0002-7156-5856; e-mail: lmatveeva@sfedu.ru

Ekaterina V. Kaplyuk, Candidate of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Chekhova, 22, Taganrog, 347922, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5768-6486; e-mail: ekapluk@sfedu.ru

Danil S. Gridnev, Candidate of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia; https://orcid.org: 0009-0004-1481-1258; e-mail: dgridnev14@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 11.03.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2026.
Принята к публикации / Accepted 18.05.2026.