

УДК 338.24:556.3

## УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ВОДНОГО ДЕФИЦИТА

**Кольцов Григорий Николаевич,**

выпускник, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Пермь, Пермский край, ул. Букирева, 15), doc.butler@mail.ru

### Аннотация

Нарастающая угроза глобального «водного банкротства» и истощение стратегических резервов пресной воды, скрытых в подземных горизонтах, требуют фундаментального пересмотра подходов к природопользованию. В условиях, когда более половины мировых мегаполисов функционируют в режиме водного стресса, а аграрный сектор парадоксальным образом наращивает потребление влаги в засушливых регионах, возникает острое противоречие между краткосрочными экономическими интересами и физической ограниченностью ресурса. Цель в данной статье – систематизировать разрозненные управленческие практики и предложить интегрированный подход, в котором технологические инновации объединяются с институциональными реформами. В работе проведён сравнительный анализ стратегий адаптации в регионах с различной гидрогеологической спецификой (Индия, Ближний Восток, Северная Африка и т. д.). Обоснован тезис о недостаточности чисто инженерных решений (бурение, переброска стока) без внедрения жестких экономических стимулов. Резюмировано, что устойчивость системы достигается лишь при переходе от реактивного реагирования к превентивному регулированию, опирающемуся на алгоритмы глубокого обучения, динамическое ценообразование. Авторский вклад состоит в разработке комплекса рекомендаций, синтезирующих инструменты цифрового мониторинга (AI, IoT) с механизмами коллективной ответственности водопользователей. Это помогает преодолеть «трагедию общин» при эксплуатации общих ресурсов. Материал представляет практический интерес для специалистов в области экономики природопользования, государственных регуляторов, гидрогеологов, руководителей агропромышленных комплексов, которые ищут пути оптимизации ресурсной базы.

**Ключевые слова:** водный дефицит, гидрология, динамическое ценообразование, микроирригация, подземные воды, устойчивое развитие, экономика природопользования, эффективность водопользования

## GROUNDWATER RESOURCE MANAGEMENT UNDER CONDITIONS OF WATER SCARCITY

**Koltsov Grigory Nikolaevich,**

Graduate, Perm State National Research University (15 Bukireva St., Perm, Perm Krai, 614068, Russian Federation), doc.butler@mail.ru

## ABSTRACT

The growing threat of global “water bankruptcy” and the depletion of strategic freshwater reserves hidden in underground aquifers necessitate a fundamental reconsideration of environmental management approaches. At a time when more than half of the world’s megacities operate under conditions of water stress, while the agricultural sector paradoxically increases water consumption in arid regions, an acute contradiction emerges between short-term economic interests and the physical limits of the resource. The purpose of this article is to systematize fragmented management practices and propose an integrated approach in which technological innovations are combined with institutional reforms. The study provides a comparative analysis of adaptation strategies in regions with different hydrogeological characteristics (India, the Middle East, North Africa, etc.). The thesis is substantiated that purely engineering solutions (drilling, water transfer) are insufficient without the introduction of strict economic incentives. It is concluded that system sustainability can be achieved only through a transition from reactive responses to preventive regulation based on deep learning algorithms and dynamic pricing mechanisms. The author’s contribution lies in the development of a set of recommendations synthesizing digital monitoring tools (AI, IoT) with mechanisms of collective responsibility among water users, which helps to overcome the “tragedy of the commons” in the exploitation of shared resources. The material is of practical interest to specialists in environmental economics, public regulators, hydrogeologists, and managers of agro-industrial complexes seeking ways to optimize the resource base.

**Keywords:** water scarcity, hydrology, dynamic pricing, micro-irrigation, groundwater, sustainable development, environmental economics, water use efficiency.

Проблематика устойчивого управления водными ресурсами перешла в разряд одной из центральных задач глобальной экономической повестки. Согласно актуальным оценкам Всемирного банка, ежегодные потери пресной воды на планете достигают 324 млрд кубометров – объём, теоретически достаточный для обеспечения 280 млн человек. По-видимому, наиболее тревожным симптомом кризиса является тот факт, что более половины мегаполисов мира уже функционируют в режиме водного стресса. В данном контексте подземные воды, которые обеспечивают около 50% питьевого водоснабжения и поддерживают 43% орошаемых земель, приобретают статус стратегического резерва глобальной продовольственной безопасности [3, 9, 11].

Специфика рассматриваемого ресурса проявляется в его скрытом характере. Так, истощение водоносных горизонтов нередко остаётся незаметным до момента наступления необратимых экологических последствий. Механизмы естественного восполнения подземных вод инерционны. А антропогенная нагрузка растёт экспоненциально. С 2000 года глобальное водопотребление увеличилось на 25%; причём, как ни парадоксально, треть этого прироста обеспечили регионы, уже испытывающие дефицит (от Центральной Америки до Северной Индии) [11].

Как представляется, ситуация усугубляется структурными диспропорциями в сельском хозяйстве. Вместо адаптации к аридным условиям, 37 стран с дефицитом водных ресурсов перешли к выращиванию более влаголюбивых культур [11]. Это неизбежно ведёт к переэксплуатации подземных резервуаров. Вследствие этого формирование научно обоснованной управленческой стратегии требует отказа от фрагментарных решений в

пользу комплексного подхода, в рамках которого совмещаются гидрогеологическое моделирование, экономические стимулы, институциональное регулирование.

Научная дискуссия относительно оптимальных подходов к управлению подземными водами сосредоточена на нескольких ключевых направлениях. Ряд исследователей фокусируется на разработке гидроэкономических моделей и механизмов водного рынка, способных обеспечить рациональное распределение ограниченных ресурсов. Иным направлением является применение геопространственных технологий, многофакторного анализа в целях выявления зон потенциального пополнения подземных вод. Современные учёные также акцентируют внимание на интеграции методов глубокого обучения, оптимизационных алгоритмов для прогнозирования доступности характеризуемых ресурсов [4, 5, 8]. При этом весьма значимым шагом на пути к институционализации устойчивого управления служит определение конкретных управленческих стратегий, где принимаются во внимание региональная специфика гидрогеологических условий и социально-экономические факторы.

Экономическая ценность подземных вод не является константой. Она обратно пропорциональна доступности поверхностных источников. В условиях, когда 2023 год стал рекордным по засухливости для речного стока за три десятилетия, нагрузка на подземные горизонты существенно возросла. Эксперты ООН характеризуют текущую ситуацию как наступление эры «водного банкротства». Они отмечают сокращение естественных запасов воды в экосистемах на 27 трлн кубометров за полвека [1, 6, 9].

Региональная динамика отражает разнонаправленные тренды. С одной стороны, Индия, благодаря государственным программам мониторинга, добилась увеличения доли безопасных единиц оценки подземных вод с 62,6% до 73,14% к 2025 году. С другой, в Чили и Иордании фиксируется устойчивое падение уровня грунтовых вод, обусловленное не столько климатом, сколько нерациональным водозабором. Этим подтверждается тезис о том, что управленческий фактор зачастую играет более значимую роль, чем природно-климатические условия [1, 10].

Современная парадигма управления базируется на интеграции цифровых технологий и социальных инноваций. Внедрение алгоритмов глубокого обучения (например, CFOA-LightGBM) помогает прогнозировать доступность подземных вод с высокой точностью, смягчая риски управленческих ошибок. Параллельно с этим, геопространственный анализ дает возможность эффективно выявлять зоны для искусственного пополнения водоносных горизонтов. А это очень важно для засухливых территорий [4, 5, 7].

Впрочем, технологии работают лишь в связке с организационными мерами. Опыт индийского штата Солапур доказал, что водное бюджетирование в сочетании с микроиригацией способно повысить результативность водопользования на 20%, одновременно увеличив доходы фермеров [8]. Ключевые технологические и управленческие инструменты систематизированы в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение эффективности инструментов управления водными ресурсами (составлено на основе [1, 8, 10])

Инструмент, технология	Регион внедрения	Ключевой результат
Системы микроиригации	Глобально (аридные зоны)	Рост эффективности водопользования на 15-25%
Водное бюджетирование	Индия (Солапур)	Экономия воды 20%, рост доходов населения на 10-15%
Агентное моделирование рынков	Агропромышленные кластеры	Оптимизация распределения квот между потребителями

AI-прогнозирование (CFOA)	Дефицитные регионы	Снижение ошибки прогноза запасов (MSE до $6,12 \times 10^{-6}$ )
---------------------------	--------------------	--

Анализ международных практик позволяет выделить успешные стратегии адаптации к дефициту. В дельтово-аллювиальных зонах (например, Терско-Кумская низменность) ключевым резервом служит восстановление простаивающих скважин и внедрение регулируемого режима орошения. В то же время, в глубоководных бассейнах Северной Африки (Алжирская Сахара) приоритет отдается сокращению затрат на бурение сверхглубоких скважин (более 1000 м) [2]. Интересен опыт Северного Кипра (регион Гюзельюрт), где для борьбы с засолением прибрежных водоносных горизонтов применили системно-динамическое моделирование, которое обосновало необходимость внешнего трансферта воды и жесткого ограничения локального водозабора [7]. Сводный анализ стратегических шагов представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Типология региональных стратегий управления подземными водами (составлено на основе [1, 2, 7])

Регион, тип бассейна	Проблема	Стратегическое решение
Терско-Кумская низменность	Неиспользование инфраструктуры	Ревизия фонда скважин (сейчас работает <10%), регулируемый полив
Алжирская Сахара	Сверхглубокое залегание (>1 км)	Оптимизация сети скважин, снижение капитальных затрат
Гюзельюрт (Сев. Кипр)	Вторжение морских вод	Импорт воды, ограничение добычи, смена агрокультур
Нижний Ганг	Хаотичный водозабор	Трансдисциплинарный подход – вовлечение общин в мониторинг

На основе анализа целесообразно сформулировать комплекс мер по усовершенствованию управления подземными водами:

- развертывание систем IoT-датчиков и AI-аналитики для превентивного выявления зон депрессии водоносных горизонтов. Благодаря этому шагу устранился информационная асимметрия. Можно будет реагировать до наступления кризиса;

- введение тарифов, которые привязаны к уровню истощения горизонта и сезонности. Такой подход, в отличие от плоской шкалы, создаст реальные экономические стимулы для водосбережения;

- создание ассоциаций водопользователей (по примеру FPCs) с правом распределения квот. Социальный контроль зачастую эффективнее административного надзора в борьбе с «трагедией общин»;

- интеграция геопространственного анализа для точечного размещения инфраструктуры инфильтрации паводковых и дождевых вод;

- масштабирование использования очищенных сточных вод и опреснения для технических нужд, высвобождая подземные источники для питьевого снабжения.

Таким образом, следует признать, что управление подземными водами в условиях дефицита требует перехода от реактивной эксплуатации к превентивному регулированию. Глобальные тренды указывают на нарастание напряженности. Впрочем, анализ показал, что сочетание технологических инноваций (AI, микроирригация) и институциональных реформ (водные рынки, партисипативное управление) способно переломить негативные тенденции. Пример Индии демонстрирует возможность восстановления равновесия даже при высокой демографической нагрузке. Практическая ценность предложенных в статье

рекомендаций заключается в их системности: устойчивость достигается не за счет единичного прорыва, а через кропотливую интеграцию точных данных, экономических стимулов, ответственного общественного поведения. Именно такой синтез поможет сохранить подземные воды как стратегический актив для будущих поколений. Дальнейшие исследования целесообразно направить на детализацию экономических механизмов динамического ценообразования водных ресурсов (с учётом пространственно-временной изменчивости дефицита); на оценку результативности различных технологий искусственного пополнения водоносных горизонтов в конкретных гидрогеологических условиях; на разработку цифровых платформ интеграции данных мониторинга с системами поддержки принятия управленческих решений. По сути, устойчивое управление подземными водами в эпоху глобального водного кризиса требует перехода от реактивных к превентивным стратегиям, от фрагментарных мер к системной интеграции инструментов различной природы.

### Список литературы:

1. В докладе ВМО подчеркивается растущий дефицит и нехватка глобальных водных ресурсов // [Электронный ресурс]: <https://wmo.int/ru/news/media-centre/v-doklade-vmo-podchekivaetsya-rastuschiy-deficit-i-nekhvatka-globalnykh-vodnykh-resursov> (дата обращения: 17.02.2026).
2. Залибеков, З.Г. Об использовании пресных подземных вод засушливых регионов мира в борьбе с опустыниванием земель / З.Г. Залибеков, С.А. Мамаев, А.Б. Биарсланов, Р.А. Магомедов, Д.Б. Асгерова, У.М. Галимова // Аридные экосистемы. – 2019. – Т. 25. – № 2 (79). – С. 3-12.
3. Копылова, А. Исследование: крупнейшим городам мира не хватает пресной воды / А. Копылова // [Электронный ресурс]: <https://snob.ru/news/issledovanie-krupneishim-gorodam-mira-ne-khvataet-presnoi-vody/> (дата обращения: 17.02.2026).
4. Лялин, А.А. Роль мониторинга в управлении эксплуатацией подземных вод / А.А. Лялин // Сборник научных трудов III научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения. – Ижевск: 2021. – С. 39-44.
5. Матова, Н.И. Содержание и практическое применение концепции интегрированного управления водными ресурсами / Н.И. Матова // Экономическое развитие России: точка баланса в мировой экосистеме и инфраструктура будущего. Материалы Международной научно-практической конференции. – Краснодар: 2022. – С. 78-83.
6. Мир вступает в «эру глобального водного банкротства» // [Электронный ресурс]: <https://news.un.org/ru/story/2026/01/1467215> (дата обращения: 17.02.2026).
7. Bolouri, F. Groundwater Management Modeling in the Güzelyurt Region (Northern Cyprus): A Group Model Building Approach / F. Bolouri, H. Gökçekuş, V. Nourani, Y. Kassem // Water. – 2025. – No. 17 // [Электронный ресурс]: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/13/2004> (дата обращения: 17.02.2026).
8. Shaikh, M.A. Economic Impacts of Collective Farming and Groundwater Management in Drought-Prone Regions: A Solapur Case Study / M.A. Shaikh // International Journal of Latest Technology in Engineering Management & Applied Science. – 2025. – No. 14(9). Pp. 830-841.

9. Water for Planet // [Электронный ресурс]: <https://www.worldbank.org/en/topic/waterresourcesmanagement> (дата обращения: 17.02.2026).
10. Water scarcity and groundwater depletion issues // [Электронный ресурс]: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2198924&reg=3&lang=1> (дата обращения: 17.02.2026).
11. World Annual Fresh Water Losses Could Supply 280 Million People // [Электронный ресурс]: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/11/04/world-annual-fresh-water-losses-could-supply-280-million-people> (дата обращения: 17.02.2026).

### References:

1. The WMO Report Highlights the Growing Deficit and Shortage of Global Water Resources. [Electronic resource]. Available at: <https://wmo.int/ru/news/media-centre/v-doklade-vmo-podcherkivaetsya-rastuschiy-deficit-i-nekhvatka-globalnykh-vodnykh-resursov> (accessed: 17.02.2026).
2. Zalibekov, Z.G., Mamaev, S.A., Biarslanov, A.B., Magomedov, R.A., Asgerova, D.B., Galimova, U.M. On the Use of Fresh Groundwater in Arid Regions of the World to Combat Land Desertification. *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 25, No. 2 (79), pp. 3–12.
3. Kopylova, A. Study: The World's Largest Cities Lack Fresh Water. [Electronic resource]. Available at: <https://snob.ru/news/issledovanie-krupneishim-gorodam-mira-ne-khvataet-presnoi-vody/> (accessed: 17.02.2026).
4. Lyalin, A.A. The Role of Monitoring in the Management of Groundwater Exploitation. In: *Proceedings of the III Scientific and Practical Conference on Hydrogeology and Water Supply Issues*. Izhevsk, 2021, pp. 39–44.
5. Matova, N.I. Content and Practical Application of the Integrated Water Resources Management Concept. In: *Economic Development of Russia: Balance Point in the Global Ecosystem and Infrastructure of the Future. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Krasnodar, 2022, pp. 78–83.
6. The World Enters the “Era of Global Water Bankruptcy”. [Electronic resource]. Available at: <https://news.un.org/ru/story/2026/01/1467215> (accessed: 17.02.2026).
7. Bolouri, F., Gökçekeş, H., Nourani, V., Kassem, Y. Groundwater Management Modeling in the Güzelyurt Region (Northern Cyprus): A Group Model Building Approach. *Water*, 2025, No. 17. [Electronic resource]. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/13/2004> (accessed: 17.02.2026).
8. Shaikh, M.A. Economic Impacts of Collective Farming and Groundwater Management in Drought-Prone Regions: A Solapur Case Study. *International Journal of Latest Technology in Engineering Management & Applied Science*, 2025, No. 14(9), pp. 830–841.
9. Water for Planet. [Electronic resource]. Available at: <https://www.worldbank.org/en/topic/waterresourcesmanagement> (accessed: 17.02.2026).
10. Water Scarcity and Groundwater Depletion Issues. [Electronic resource]. Available at: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2198924&reg=3&lang=1> (accessed: 17.02.2026).

11. World Annual Fresh Water Losses Could Supply 280 Million People. [Electronic resource]. Available at: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/11/04/world-annual-fresh-water-losses-could-supply-280-million-people> (accessed: 17.02.2026).