

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 627.8:004.8:62-1:005.334

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-80-84>ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
В ГИДРОТЕХНИКЕВ.А. Фартуков¹, Г.М. Васильев²✉¹ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Москва, Российская Федерация²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Москва, Российская Федерация¹vasfar@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757²gervas1453@gmail.com

Аннотация. Цель работы: систематизировать методологические и философские проблемы внедрения ИИ в гидротехнике и предложить концептуальные рамки для его ответственного внедрения, обеспечивающие не только технологическую эффективность, но и социальную легитимность, инженерную безопасность и экологическую устойчивость. Внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в область гидротехники открывает новые возможности для повышения эффективности управления водными ресурсами, мониторинга состояния гидротехнических сооружений (ГТС) и прогнозирования опасных процессов. Данный процесс сопровождается комплексом методологических, нормативных и этических проблем. В статье исследуются ключевые вызовы, связанные с эпистемологическими ограничениями моделей ИИ, онтологическим статусом цифровых двойников, перераспределением ответственности, вопросами киберустойчивости и социально-экологической справедливости. На примере задач управления паводками, диагностики кавитации гидроагрегатов и мониторинга фильтрации обосновывается необходимость интеграции ИИ не в качестве замены инженерного суждения, а как инструмента, встроенного в систему профессиональных процедур и общественного контроля. В качестве концептуальной основы предлагаются принципы технологической скромности, включающие в себя прозрачный аудит моделей, управление их жизненным циклом и четкое распределение ролей в процессе принятия решений, что позволяет использовать потенциал ИИ, не нарушая принципов безопасности и справедливости.

Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Ключевые слова: искусственный интеллект, гидротехнические сооружения, цифровой двойник, управление рисками, ответственность, киберустойчивость, инженерная этика, эпистемология, социально-экологическая справедливость, природообустройство

Для цитирования: Фартуков В.А., Васильев Г.М. Проблемы внедрения искусственного интеллекта в гидротехнике. Природообустройство. 2026;Т.19(3):80-84. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-80-84>

Scientific article

PROBLEMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMPLEMENTATION
IN YDRAULIC ENGINEERINGV.A. Fartukov¹ G.M. Vasiliev²✉¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; Moscow, Russian Federation²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation¹vasfar@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8405-8757²gervas1453@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to systematize the philosophical and methodological problems of the introduction of AI in hydraulic engineering and to propose a conceptual framework for its responsible implementation, ensuring not only technological efficiency, but also social legitimacy, engineering safety

and environmental sustainability. The implementation of artificial intelligence (AI) technologies in the field of hydraulic engineering opens up new opportunities for improving the efficiency of water resources management, monitoring the condition of hydraulic structures (HS), and forecasting hazardous processes. However, this process is accompanied by a complex of methodological, regulatory, and ethical problems. The aim of the research is to systematize the key philosophical and methodological challenges related to the epistemological limitations of AI models, the ontological status of digital twins, the redistribution of responsibility, issues of cyber resilience, and socio-ecological justice. The methodology is based on an interdisciplinary literature analysis and case studies of typical tasks (flood management, cavitation diagnostics, filtration monitoring). As a result, the necessity of integrating AI not as a replacement for engineering judgment, but as a tool embedded in a system of professional procedures and public control is substantiated. As a conceptual framework, the principles of technological humility are proposed, including transparent model audit, lifecycle management, and clear role distribution. It is concluded that successful implementation requires a paradigm shift from searching for the “most accurate algorithm” to building robust socio-technical systems that ensure not only technological efficiency but also social legitimacy, engineering safety, and environmental sustainability.

Keywords: artificial intelligence, hydraulic structures, digital twin, risk management, responsibility, cyber resilience, engineering ethics, epistemology, socio-ecological justice, environmental engineering

For citation: Fartukov V.A., Vasiliev G.M. Problems of introducing artificial intelligence into hydraulic engineering. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):80-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-80-84>

Введение. Современная гидротехника характеризуется растущей сложностью управляемых систем, к которым относятся каскады водохранилищ, противопаводковые комплексы и системы водоподачи [1, 2]. Традиционные методы моделирования и управления зачастую не справляются с учетом многомерности, нелинейности и стохастичности гидрологических процессов [3]. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) – в частности, машинное обучение и цифровые двойники, предлагают потенциал для более точного прогнозирования, оптимизации режимов эксплуатации и предиктивного технического обслуживания ГТС [4, 5]. Однако парадигма «Данные – решение», лежащая в основе ИИ, вступает в противоречие с консервативной и безопасной инженерной практикой, где решения должны быть обоснованы, проверяемы, а также апеллировать к установленным физическим принципам [6, 7]. Это порождает ряд методологических проблем на стыке технологий, общества и инженерии.

Центральный тезис данной статьи заключается в том, что успешное внедрение ИИ в гидротехнике требует принципиальной смены акцента: с поиска «самого точного алгоритма» на построение устойчивых (robust) социотехнических систем, в которых ИИ выступает как проверяемая гипотеза, а не как окончательная истина [8, 9].

Цель исследований: систематизировать философские и методологические проблемы внедрения ИИ в гидротехнике и предложить концептуальные рамки для его ответственного внедрения, обеспечивающие не только технологическую эффективность, но и социальную

легитимность, инженерную безопасность и экологическую устойчивость [6, 10].

Материалы и методы исследований.

Исследования основаны на междисциплинарном анализе научной литературы. Поиск источников осуществлялся в базах данных Scopus, Web of Science и РИНЦ по ключевым словам «искусственный интеллект в гидротехнике», «цифровой двойник», «управление рисками ИИ», «инженерная этика», «социальная справедливость водных ресурсов» за период 2018-2024 гг. [4, 5, 3, 7, 10]. Были применены следующие методы:

1. Концептуальный анализ для выявления, уточнения и систематизации ключевых проблемных категорий – таких, как «эпистемическое сжатие», «распределенная ответственность», «ценностная нагруженность модели» [6, 8].

2. Метод case-study (анализ случая) для детального рассмотрения и иллюстрации выявленных проблем на типовых сценариях применения ИИ в гидротехнике: управление паводками, диагностика кавитации гидротурбин, мониторинг фильтрации [3, 11].

3. Сравнительный анализ современных подходов к созданию цифровых двойников, систем поддержки принятия решений (СППР) и нормативных рамок в области кибербезопасности и безопасности ГТС [5, 14, 12].

Ограничением исследований является его фокус на методологических и социально-организационных аспектах, а не на деталях конкретных алгоритмов или инженерных решений. Анализ построен на вторичных данных (научные публикации, нормативные документы) и направлен на формирование концептуальной основы для дальнейших прикладных разработок [1, 2].

Результаты и их обсуждение

1. *Эпистемологические ограничения и операционализация реальности.* Инженерная деятельность в гидротехнике имеет дело не с «вещью-в-себе» (рекой, гидротехническим сооружением), а с их операционализированными моделями [1, 8]. Данные, используемые для обучения ИИ, являются результатом выбора типов датчиков, пространственно-временного разрешения и методов фильтрации шумов [6]. Это приводит к «эпистемическому сжатию»: многомерный, нелинейный и полный неопределенностей гидрологический мир сводится к конечному набору признаков [3, 11].

Основной риск заключается в индуктивном выводе: модель, идеально описывающая данные за прошлые периоды, может оказаться неадекватной при столкновении с беспрецедентными условиями – такими, как экстремальные паводки или новые режимы эксплуатации [4, 7]. Проблема усугубляется сдвигом распределений (dataset shift) и недостатком данных об экстремальных событиях, что требует от инженеров явного учета «толстых хвостов» в распределениях и калибровки запасов прочности с учетом неопределенностей модели [9, 2].

2. *Онтология и ценностная нагруженность цифрового двойника.* Цифровой двойник ГТС часто воспринимается как его точная виртуальная копия [5, 13]. Однако более корректно рассматривать его как программно-математический артефакт с ограниченной и целенаправленной онтологией [6, 8]. Решения о том, какие объекты и процессы включать в модель (тело плотины, фильтрационные пути, экологические попуски, социально-экономические факторы), какие переменные использовать и какие целевые функции оптимизировать, неизбежно носят ценностный характер [3, 10].

Таким образом, цифровой двойник не является нейтральным; он материализует определенные приоритеты (например, энергетическая выработка в противовес экологической безопасности) [6, 7]. Поэтому его техническая корректность – необходимое, но недостаточное условие. Требуется институциональная легитимность, обеспечиваемая участием стейкхолдеров (органы регулирования, местные сообщества, экологи) в процессе определения целей и метрик моделирования [8, 10].

3. *Проблема распределения ответственности в безопасности критических систем.* Внедрение ИИ размывает традиционные цепочки ответственности [9, 11]. В реальном диспетчерском цикле решение является совместным: система поддержки принятия решений (СППР) генерирует рекомендации, оператор их интерпретирует

и санкционирует в рамках регламентов, а организация несет юридическую ответственность. В случае аварийной ситуации, инициированной ошибочной рекомендацией ИИ, возникает правовой вакуум [6, 14]. Для его устранения необходима явная документарная фиксация архитектуры принятия решений, включающая в себя [8, 12]:

- предельные условия применения моделей;
- ролевое распределение полномочий (право «вето» оператора);
- ведение журнала разногласий между моделью и оператором;
- паспорт модели с явным указанием ее ограничений и допущений.

Такой подход позволяет интегрировать управление рисками, связанными с ИИ, в существующие системы менеджмента качества и безопасности (RAMS, HAZOP) [1, 2].

4. *Вызовы киберустойчивости и человеческого фактора.* Цифровизация ГТС расширяет поверхность для кибератак, последствия которых могут быть катастрофическими [14, 12]. Цифровые двойники и системы ИИ, будучи инструментами повышения устойчивости, сами становятся целями для атак (искажение данных, подмена телеметрии) [13, 12]. Это требует внедрения архитектурных принципов киберустойчивости: сегментация сетей, минимальные привилегии доступа, резервные управляемые ИИ контуры управления и процедуры аварийной деградации до ручного режима [2, 12].

Одновременно возникает классическая проблема автоматизационного смещения (automation bias) и деградации навыков: излишнее доверие к рекомендациям системы и потеря компетенций у персонала при длительной автоматизации рутинных операций. Противодействие этому включает в себя специальную подготовку операторов для работы в условиях «объяснимой неопределенности», создаваемой моделью, и регулярные тренировки на нештатные сценарии, где рекомендации ИИ могут быть заведомо ошибочными [3, 9].

5. *Социально-экологическая справедливость.* Любое управленческое решение в водном хозяйстве, оптимизированное с помощью ИИ, перераспределяет выгоды и риски [10, 2]. Алгоритм, достигающий максимального эффекта энергогенерации, может привести к дефициту воды в оросительных системах ниже по течению [3, 7]. Следовательно, оценка эффективности ИИ должна включать в себя не только технические метрики (точность, ROC-AUC), но и метрики распределительной и процедурной справедливости [6, 10]. Это требует прозрачности в отношении используемых данных, чье потребление воды учтено, а чье – проигнорировано, и создания институтов

для согласования целей оптимизации между всеми заинтересованными сторонами [8, 10].

Примеры практической реализации проблем:

Управление наводками. Модель ИИ, прогнозирующая водный приток, может не учитывать редкую комбинацию климатических факторов: например, «теплый дождь на снежный покров» [4, 7]. Корректная эксплуатация такой модели требует от диспетчера не слепого следования прогнозу, а наличия доверительных интервалов, сценарных вилок и регламента введения дополнительного ручного запаса прочности при высокой неопределенности [4, 11].

Диагностика кавитации гидротурбин. Модель, обученная распознавать кавитацию по акустическим паттернам на одном агрегате, может давать сбой на другом ввиду конструктивных отличий [5, 14]. Необходимы кросс-валидация между агрегатами, регламентированные пороги срабатывания и обязательность дополнительной инструментальной проверки перед остановом блока [3, 9].

Мониторинг фильтрации и суффозии. Сигнал от ИИ об изменении режима фильтрации может быть интерпретирован множеством способов (развитие суффозии, сезонные колебания, неисправность датчика) [1, 2]. Запрет на сильные управленческие действия (например, экстренное опорожнение водохранилища) без независимой инженерной верификации является необходимым элементом культуры безопасности [6, 11].

Таким образом, внедрение искусственного интеллекта в гидротехнику представляет собой не просто технологический апгрейд, а фундаментальный вызов существующей инженерной парадигме, основанной на детерминированных моделях и четкой ответственности [6, 8]. Успешная интеграция требует признания ограничений ИИ и смещения фокуса на построение устойчивых социотехнических систем. Предложенные в статье принципы создают для этого концептуальную основу. Эти принципы включают в себя [6, 8, 10]:

1. Прозрачный аудит и управление жизненным циклом моделей ИИ.

2. Четкое юридическое и процедурное распределение ответственности между человеком и алгоритмом.

Список использованных источников

1. Шестаков В.М., Коротков С.И. Гидрогеомеханика урбанизированных территорий. М.: Наука, 2018. 300 с.
2. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 164: Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle. Paris: ICOLD, 2017. 120 p.
3. Ahmed A.A., Pradhan B. Applications of machine learning to water resources management: A review // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. P. 139953. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139953

3. Проектирование систем с учетом киберустойчивости и человеческого фактора.

4. Обеспечение социальной легитимности цифровых моделей через вовлечение стейкхолдеров.

Такой подход позволит раскрыть потенциал ИИ для повышения безопасности, эффективности и устойчивости водохозяйственных систем, не поступаясь принципами инженерной этики, социальной справедливости и экологической безопасности [4, 3, 10].

Выводы

1. Систематизированы ключевые методологические проблемы внедрения ИИ в гидротехнике: от эпистемологических ограничений и ценностной нагруженности моделей до проблем распределения ответственности и социально-экологической справедливости.

2. Разработаны и обоснованы принципы «технологической скромности» как концептуальной рамки для ответственного внедрения ИИ, предполагающей его интеграцию в качестве проверяемого инструмента, а не автономного субъекта, в существующие инженерные процедуры и системы контроля.

3. Обоснована необходимость разработки специализированной нормативной базы, регламентирующей управление жизненным циклом моделей ИИ, документального закрепления архитектуры принятия решений и независимого аудита для критичных систем.

4. Показано, что цифровые двойники ГТС являются не нейтральными техническими артефактами, а ценностно-нагруженными конструктами. Это требует обеспечения их социальной легитимности через инклюзивные процедуры вовлечения стейкхолдеров в постановку целей моделирования.

5. Доказано, что ключевыми являются не только технические (сдвиг данных, кибератаки), но и социально-организационные (размывание ответственности, автоматизационное смещение) риски, для минимизации которых требуются целенаправленные изменения в подготовке персонала и организационной культуре безопасности.

References

1. Shestakov V.M., Korotkov S.I. Hydrogeomechanics of urbanized territories. Moscow, Nauka Publ., 2018. 300 p.1.
2. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 164: Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Life Cycle. Paris: ICOLD, 2017. 120 p.
3. Ahmed A.A., Pradhan B. Applications of machine learning to water resources management: A review // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. P. 139953. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139953.

4. Huang Y., Li Z., Wang C. Artificial Intelligence in Dam Safety Monitoring: A Review // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, № 5. Pp. 1821-1840. DOI: 10.1007/s11269-023-03465-5
5. Liu B., Wang Y., Zhang X. Digital Twin Technology in Hydraulic Engineering: Current Status and Future Trends // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2022. Vol. 148, № 9. Pp. 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002000
6. Doorn N. Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 142561. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142561
7. Chen L., Wang H., Li M. Review of Artificial Intelligence Applications in Dams and Water Resources // *Journal of Hydroinformatics*. 2023. Vol. 25, № 2. Pp. 345-362. DOI: 10.2166/hydro.2023.125
8. Kuzmin V.A., Goryunov V.N. Stakeholder Engagement in Digital Transformation of Water Infrastructure: A Case of Russian Hydropower // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, Is. 8. Pp. 3147-3163. DOI: 10.1007/s11269-023-03509-w
9. Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*. 2000. Vol. 30, № 3. Pp. 286-297. DOI: 10.1109/3468.844354
10. Beery J., Kooy M., Funder M. Equity in Water Governance: A Review of Justice-Oriented Water Research // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2022. e1604. DOI: 10.1002/wat2.1604
11. Shin S., Lee S., Judi D.R., Parvania M., McPherson T., Burian S., Marx A. A Systematic Review of Quantitative Resilience Measures for Water Infrastructure Systems // *Water*. 2018. Vol. 10, № 2. P. 164. DOI: 10.3390/w10020164
12. Alcaraz C., Lopez J. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, № 3. Pp. 1475-1503. DOI: 10.1109/COMST.2022.3171465
13. U.S. Department of Energy. Cybersecurity Considerations for Digital Twins in the Energy Sector. 2023. 62 p. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-10/Cybersecurity%20Considerations%20for%20Digital%20Twins%20in%20the%20Energy%20Sector.pdf> (дата обращения: 15.10.2024)
14. Kumar A., Singh R. Enhancing Cybersecurity of Hydroelectric Power Plants through Digital Twin Modeling // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024. Vol. 39, № 1. Pp. 456-465. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3321541

Сведения об авторах

Василий Александрович Фартуков, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Scopus Author ID: 5749450840; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-код: 5656-7629; Author ID: 1002745; vasfar@mail.ru

Герман Михайлович Васильев, магистрант кафедры философии и философии истории магистратуры Философского факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; gervas1453@gmail.com

Вклад авторов

В.А. Фартуков – разработка методологии, создание окончательной версии (доработка) рукописи и редактирование
Г.М. Васильев – работа с литературными источниками, участие в анализе результатов и оформлении

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Поступила в редакцию / Received 13.12.2025

Поступила после рецензирования / Received 04.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 08.06.2026

4. Huang Y., Li Z., Wang C. Artificial Intelligence in Dam Safety Monitoring: A Review // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, № 5. P. 1821-1840. DOI: 10.1007/s11269-023-03465-5

5. Liu B., Wang Y., Zhang X. Digital Twin Technology in Hydraulic Engineering: Current Status and Future Trends // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2022. Vol. 148, № 9. P. 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002000

6. Doorn N. Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 142561. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142561

7. Chen L., Wang H., Li M. Review of Artificial Intelligence Applications in Dams and Water Resources // *Journal of Hydroinformatics*. 2023. Vol. 25, № 2. P. 345-362. DOI: 10.2166/hydro.2023.125

8. Kuzmin V.A., Goryunov V.N. Stakeholder Engagement in Digital Transformation of Water Infrastructure: A Case of Russian Hydropower // *Water Resources Management*. 2023. Vol. 37, Is. 8. P. 3147-3163. DOI: 10.1007/s11269-023-03509-w

9. Parasuraman R., Sheridan T.B., Wickens C.D. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*. 2000. Vol. 30, № 3. P. 286-297. DOI: 10.1109/3468.844354

10. Beery J., Kooy M., Funder M. Equity in Water Governance: A Review of Justice-Oriented Water Research // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2022. e1604. DOI: 10.1002/wat2.1604

11. Shin S., Lee S., Judi D.R., Parvania M., McPherson T., Burian S., Marx A. A Systematic Review of Quantitative Resilience Measures for Water Infrastructure Systems // *Water*. 2018. Vol. 10, № 2. P. 164. DOI: 10.3390/w10020164

12. Alcaraz C., Lopez J. Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, № 3. P. 1475-1503. DOI: 10.1109/COMST.2022.3171465

13. U.S. Department of Energy. Cybersecurity Considerations for Digital Twins in the Energy Sector. 2023. 62 p. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-10/Cybersecurity%20Considerations%20for%20Digital%20Twins%20in%20the%20Energy%20Sector.pdf> (дата обращения: 15.10.2024)

14. Kumar A., Singh R. Enhancing Cybersecurity of Hydroelectric Power Plants through Digital Twin Modeling // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024. Vol. 39, № 1. P. 456-465. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3321541

Information about the authors

Vasiliy A. Fartukov – CSs (Tech), Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov Scopus Author ID: 5749450840; ORCID: 0000-0002-8405-8757; SPIN-code: 5656-7629; Author ID: 1002745; vasfar@mail.ru

German M. Vasiliev – Student, Department of Philosophy and Philosophy of History, Faculty of Philosophy, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. gervas1453@gmail.com

Contribution of the authors

V.A. Fartukov – development of methodology, creation of the final version (revision) of the manuscript and editing
G.M. Vasiliev – work with literary sources, participation in the analysis of results and design