



“ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА”

Насридинов Рустамжон Бахтиёржон угли

ORCID:0009-0003-2422-9029

Преподаватель

**Ташкентский университет информационных
технологий имени Мухаммада аль-Хоразми**

E-mail: rustamjon1400@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17358737>

ARTICLE INFO

Received: 12th October 2025

Accepted: 14th October 2025

Online: 15th October 2025

KEYWORDS

*искусственный интеллект,
подземные воды, физическое
моделирование, загрязнение,
PINN, цифровой*

ABSTRACT

В работе представлен гибридный подход, объединяющий физические модели и методы искусственного интеллекта для анализа загрязнения подземных и поверхностных вод. Использование модели Physics-Informed Neural Network (PINN) позволило повысить точность прогнозирования и сократить время расчётов. Результаты показали снижение концентрации нитратов с 0,05 до 0,014 моль/л и увеличение скорости моделирования в 12 раз.

Введение

Проблема загрязнения подземных и поверхностных вод является одной из наиболее актуальных в современном мире. Рост антропогенной нагрузки, активное развитие сельского хозяйства и промышленности, а также изменение климата усиливают процессы инфильтрации загрязняющих веществ в грунтовые слои, что представляет серьёзную угрозу для экологической безопасности и здоровья населения.

В этих условиях важное значение приобретает развитие физико-математических и интеллектуальных моделей, способных точно описывать взаимодействие систем «поверхностная-подземная вода» и прогнозировать распространение загрязнителей.

Цель исследования.Целью данного исследования является разработка и апробация гибридной модели, основанной на сочетании физических законов гидрогеологических процессов и методов искусственного интеллекта, для цифрового анализа и прогнозирования загрязнения подземных и поверхностных вод.

Основная часть

Современные подходы к исследованию гидрогеологических процессов требуют объединения классических физических методов моделирования с технологиями искусственного интеллекта. Движение подземных и поверхностных вод, а также распространение загрязняющих веществ представляют собой сложные нелинейные процессы, зависящие от свойств почвенного слоя, динамики инфильтрации, химических реакций и климатических факторов. Традиционные физико-математические модели, основанные на уравнениях Дарси, Ричардса и адвекционно-диффузионно-реакционных (ADR) системах, позволяют достаточно точно описывать

поведение водных потоков, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и времени для моделирования крупномасштабных систем.

В данном исследовании разработан гибридный подход, основанный на сочетании физических законов гидродинамики и методов искусственного интеллекта, что обеспечивает повышение эффективности и точности расчётов. В качестве базовой физической основы использованы модели **MODFLOW** и **MT3DMS**, описывающие движение подземных вод и транспорт загрязняющих веществ. Для сокращения времени вычислений и повышения прогностических возможностей применена архитектура **Physics-Informed Neural Network (PINN)**, в которой физические уравнения интегрируются в структуру нейронной сети через функцию потерь. Это позволило объединить строгость физических законов с гибкостью машинного обучения. Модель была протестирована на примере гидрогеологических условий **Зарафшанской долины**. Расчёты проводились для различных сценариев, включающих естественные условия, повышенную интенсивность орошения и изменение температуры окружающей среды. Анализ полученных данных показал, что концентрация нитратных загрязнителей за 30 суток снизилась с **0,05 до 0,014 моль/л**, что соответствует активному протеканию процессов биологической денитрификации и молекулярной диффузии. Полученные результаты продемонстрировали высокую чувствительность модели к гидравлической проводимости (K), коэффициентам дисперсии (D) и кинетическим параметрам реакций (λ), что обеспечивает физическую интерпретируемость вычислений.

Таблица 1.

Сравнительные результаты физических и нейросетевых моделей

№	Тип модели	Время расчёт а (с)	Коэффициент точности (R^2)	RMSE	Краткое заключение
1	MODFLOW–MT3DMS (физическая модель)	65.4	0.92	0.18	Высокая точность, но длительное время вычислений
2	PINN (модель искусственного интеллекта)	5.2	0.95	0.17	В 12 раз быстрее, точность сохранена
3	Гибридная (AI + Physics)	8.1	0.96	0.16	Оптимальный результат, сбалансированный подход

Сравнение физической модели и нейросетевой суррогатной модели показало, что **PINN обеспечивает ускорение вычислений примерно в 12 раз** при сохранении высокой точности прогнозирования ($R^2 = 0.95$, $RMSE = 0.17$). Таким образом, использование суррогатных моделей на основе искусственного интеллекта позволяет

значительно оптимизировать расчётные процедуры и проводить оперативный анализ сложных систем «поверхностная–подземная вода» в реальном времени.

Дополнительно была проведена оценка пространственно-временной динамики загрязнения, что позволило построить цифровые карты распределения нитратов и выделить зоны наибольшего риска. Наиболее интенсивное загрязнение отмечено в районах активного орошения и приповерхностных слоях, где наблюдается взаимное влияние потоков подземных и поверхностных вод. Предложенный подход представляет собой основу для создания **«цифровых двойников» (Digital Twin)** водных систем, которые могут использоваться для мониторинга качества воды, прогнозирования последствий антропогенной нагрузки и оптимизации водных ресурсов. Применение гибридных моделей (AI + Physics) открывает новые возможности для экологического прогнозирования и управления природными системами в условиях изменяющегося климата. Таким образом, проведённое исследование подтвердило эффективность синергии физических моделей и методов искусственного интеллекта при анализе загрязнения водных систем. Полученные результаты обладают высокой практической значимостью и могут быть использованы для разработки интеллектуальных систем мониторинга, экологической оценки и управления водными ресурсами на региональном уровне.

Заключение

Результаты исследования подтверждают эффективность совмещения физических моделей и технологий искусственного интеллекта при анализе процессов загрязнения водных систем. Разработанный подход обеспечивает:

1. Повышение точности и скорости моделирования гидрогеологических процессов;
2. Возможность прогнозирования загрязнения при изменении климатических и антропогенных факторов;
3. Основание для внедрения **«цифровых двойников» (Digital Twin)** в управление водными ресурсами и экологический мониторинг.

Предлагаемая методология может быть адаптирована для других природных систем — атмосферных, почвенных и гидрохимических — и является перспективным направлением в развитии цифровой экологии и устойчивого управления природными ресурсами

Использованная литература:

1. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440.
2. Cardenas, M. B. (2021). Hydrogeologic and biogeochemical processes in hyporheic zones: A review. *Water Resources Research*, 57(9), e2020WR029325.
3. Li, X., Wang, Y., & Chen, H. (2023). Artificial Intelligence Modeling for Groundwater Environments. *Environmental Science & Technology*, 57(6), 3452–3466.
4. U.S. Geological Survey (USGS). (2022). GSFLOW – Coupled Groundwater and Surface Water Flow Model: User's Guide and Technical Documentation. Reston, Virginia, USA