

УДК 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47

А. А. Мальцев<sup>1</sup>  
Ю. В. Петров<sup>2</sup>

**Возможности применения цифровых  
двойников территорий и искусственного  
интеллекта для мониторинга экзогенных  
геологических процессов в Тюменской  
области**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет»,  
г. Тюмень

e-mail: andriussmaltsev@yandex.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет»,  
г. Тюмень

e-mail: petrov19811201@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность применения цифровых двойников территорий и искусственного интеллекта для мониторинга экзогенных геологических процессов в Тюменской области. Экзогенные геологические процессы оказывают значительное негативное воздействие на населённые пункты, инфраструктуру и окружающую среду региона. Традиционные методы мониторинга не обеспечивают достаточной оперативности и точности прогнозирования опасных явлений, таких как оползни, овражная эрозия и подтопление. Внедрение цифровых двойников территорий во взаимодействие с применением искусственного интеллекта позволяет решить эти проблемы за счёт создания динамических цифровых моделей территорий, автоматизации сбора и анализа больших объёмов данных, а также прогнозирования изменений в режиме реального времени. Приводятся примеры успешного использования данных технологий в России и за рубежом, подчёркиваются их преимущества, включая повышение точности выявления угроз на 20% по сравнению с традиционными методами. Для апробации предложено внедрить цифровые двойники территорий на Тюменском и Тобольском участках государственной наблюдательной сети за экзогенными геологическими процессами, где наблюдаются высокая антропогенная нагрузка и частые проявления опасных процессов. Результаты исследования демонстрируют перспективность использования современных технологий для повышения эффективности мониторинга экзогенных геологических процессов, снижения рисков для населения и обеспечения экологической безопасности.

**Ключевые слова:** цифровой двойник территории, искусственный интеллект, экзогенные геологические процессы, мониторинг окружающей среды, Тюменская область, оползневые процессы, овражная эрозия, геоинформационные системы, интернет-вещей.

## Введение

На всей территории России наблюдаются экзогенные геологические процессы (ЭГП). Данные процессы можно разделить на две группы: уникальные, характерные для определенных регионов (морозное пучение грунтов на арктических территориях или селевые потоки в горных регионах), и

общераспространенные. На территории Тюменской области (здесь и далее рассматривается Тюменская область без автономных округов) распространены общераспространенные гравитационные, эрозионные, суффозионные процессы, подтопление [1]. Согласно ежегодным Докладам об экологической ситуации в Тюменской области, 60% населенных пунктов подвержены негативному воздействию ЭГП. Это воздействие, в первую очередь, сказывается на жилых домах, хозяйственных постройках, а также на таких линейных объектах, как ЛЭП и автомобильные дороги. Кроме того, воздействие затрагивает земли лесного фонда, особо охраняемые природные территории (ООПТ) и сельскохозяйственные угодья. По состоянию на 2023 г. на территории области зафиксировано 22 ЭГП на пяти участках наблюдений. Общая площадь этих участков составляет 292,8 км<sup>2</sup>, в то время как площадь Тюменской области составляет 160122 км<sup>2</sup>, т.е. менее 1% [1, 2, 3, 4].

Крупные населенные пункты Тюменской области расположены в основном вдоль крупных рек региона: Иртыш, Тобол, Тура, Ишим, Тавда. Так как генезис ЭГП на территории области обусловлен в основном деятельностью речных потоков, которые вымывают грунтовые массы и уменьшают устойчивость берегов, целесообразно получать информацию о состоянии литосферы на территориях населенных пунктов в оперативном порядке, для предупреждения опасных последствий. Ярко выраженная климатическая зональность в Тюменской области оказывает значительное влияние на специфику мониторинга ЭГП: необходимо непрерывное измерение климатических параметров, таких как температура атмосферного воздуха и количество атмосферных осадков.

Для обеспечения непрерывности поступления информации о состоянии литосферных, гидрологических и атмосферных условий, имеющих ключевое значение для активизации ЭГП на территории Тюменской области, целесообразно внедрить технологию цифровых двойников территорий участков наблюдения. Цифровой двойник территории (ЦДТ) – цифровая информационная модель физической системы, созданная как самостоятельная сущность и связанная с соответствующей существующей или проектируемой физической системой [5]. Внедрение ЦДТ сопряжено с проблемой обработки и накопления большого объема данных, которую можно разрешить за счёт привлечения возможностей искусственного интеллекта (ИИ).

### Материалы и методы

В контексте современного использования ЦДТ и ИИ можно выделить два ключевых аспекта. Во-первых, это развитие вычислительных мощностей, которое делает новые технологии доступными для широкого применения. Во-вторых, их эффективность как в теоретическом, так и в практическом плане. Применение ЦДТ и ИИ позволяет решать задачи анализа и прогнозирования с высокой точностью и оперативностью, а также значительно повышать экономическую эффективность по сравнению с традиционными методами мониторинга. Цель работы – систематизировать возможности применения ЦДТ и ИИ для мониторинга экзогенных геологических процессов на территории Тюменской области. Материалы исследования: результаты исследований российских и зарубежных ученых, посвященных применению цифровых двойников территории и искусственного интеллекта в мониторинге состояния окружающей среды, в

частности экзогенных геологических процессов, открытые данные по государственному экологическому мониторингу, а также ресурсы государственных информационных систем в части применения геоинформационных ресурсов.

### **Результаты и обсуждение**

Ряд научных исследований посвящён использованию ЦДТ и ИИ в области мониторинга состояния окружающей среды отражает технологический подход к обработке и анализу данных с применением методов машинного обучения, искусственного интеллекта и аналитики больших данных в контексте мониторинга состояния атмосферного воздуха, донных отложений и водных ресурсов [6, 7, 8, 9, 10]. Кроме того, были предложены стратегии создания ЦДТ и их потенциального применения в области экологического мониторинга [11] и установлено, что точность выявления потенциальных угроз для окружающей среды и безопасности человека с использованием ИИ на 20% выше, чем при традиционных методах мониторинга [12,13, 14].

В рамках исследования [15] группа ученых из Гонконгского университета науки и технологии обозначила проблему отсутствия возможности оперативного моделирования возникновения и перемещения оползней для оценки рисков в режиме реального времени. Предложено создать цифровой аналог оползнеопасного склона с возможностью имитации оползневых процессов, который использует новый метод моделирования перемещения оползневых масс, основанный на позиционной динамике. Результаты исследования показали, что данный метод более эффективен по сравнению с традиционными методами исследования и прогнозирования – использование ЦДТ позволяет проводить оценку рисков активизации оползневых процессов в режиме реального времени. Цифровой аналог исследуемой территории позволяет получать оперативную информацию о состоянии оползнеопасного склона на примере реального случая активизации оползня, произошедшего в Гонконге.

Ключевым преимуществом использования ЦДТ является возможность обновления модели исследуемой территории в режиме реального времени на основе данных мониторинга [16]. В частности, модель оползневого склона, которая в режиме реального времени корректирует свои параметры с учетом фактических и прогнозируемых данных о состоянии атмосферы. Эта модель способна предсказывать гидравлические и механические свойства грунта на основе данных многолетних наблюдений.

Одним из ключевых аспектов при мониторинге ЭГП является применение геоинформационных систем (ГИС). Для эффективного использования ГИС в мониторинге ЭГП требуется большой объем данных, например, космические снимки высокого разрешения и цифровые модели рельефа. С целью автоматизации обработки данных при работе с ГИС эффективно использование ИИ. В [17] исследователи подняли проблему трудоемкости использования традиционных методов картографирования процессов овражной эрозии. Для решения предлагается внедрение в ГИС технологий ЦДТ и ИИ. В рамках исследования предложен алгоритм, который предполагает использование датчиков, расположенных непосредственно на исследуемой территории, для сбора данных о влажности почв, количества атмосферных осадков и характеристики рельефа. Эти данные передаются в ЦДТ, где они обрабатываются в режиме реального времени: ИИ анализирует

исторические данные и информацию, полученную в режиме реального времени, для прогнозирования процессов овражной эрозии.

Модели машинного обучения выявляют закономерности и ключевые факторы, влияющие на процессы овражной эрозии. ЦДТ моделирует различные сценарии развития ситуации и оценивает методы управления земельными ресурсами. Авторами исследования был сделан вывод, что интеграция ЦДТ и ИИ в ГИС позволяет упростить процесс картографирования и прогнозирования процессов оврагообразования. Автоматизация сбора и анализа данных сокращает временные и трудовые затраты, необходимые для мониторинга процессов овражной эрозии. Благодаря предоставлению данных в режиме реального времени и прогнозной информации, ЦДТ и ИИ позволяют осуществлять превентивные меры по предотвращению овражной эрозии.

Внедрение ЦДТ и ИИ в систему мониторинга ЭГП может быть перспективным не только для Тюменской области, но и для всей России. Основным преимуществом использования ЦДТ и ИИ является возможность работать с большим объемом данных и предоставлять информацию о состоянии окружающей среды в режиме реального времени. Накопленные данные за длительный период мониторинга, а также их интеграция с традиционными и другими высокотехнологичными методами, такими как дистанционное зондирование Земли и лазерное сканирование рельефа, могут значительно повысить эффективность мониторинговых мероприятий.

В рамках мониторинга ЭГП на территории Тюменской области, представляется целесообразным использование ЦДТ и ИИ. Участки наблюдений на территории Тюменской области возможно оснастить датчиками, которые станут основой Интернета вещей – сети устройств, объединенных в единую систему, способных собирать данные и обмениваться ими. С учётом накопленных массивов данных в существующих территориальных банках данных в геоинформационном формате возможно и ретроспективное и сравнительное исследование по выделенным участкам Тюменской области [18, 19]. Эти датчики предназначены для сбора информации о состоянии компонентов окружающей среды, и будут соединены в единую сеть, что обеспечит непрерывный мониторинг изменений в окружающей среде, преобразуя полученные данные в формат, пригодный для цифровой обработки.

Использование Интернета вещей в режиме реального времени позволит получать информацию о состоянии компонентов окружающей среды, влияющих на активизацию опасных ЭГП. Необходимо осуществлять мониторинг в режиме реального времени следующих параметров: температура атмосферного воздуха, количество выпавших атмосферных осадков, деформационные и прочностные свойства грунтов, положение реперов и грунтовых марок, скорость течения водотоков, смещение грунтовых масс. После сбора информации с датчиков она будет поступать в ЦДТ, где с помощью ИИ результаты будут обрабатываться. Это позволит получить полную картину происходящего в реальном времени и возможность прогнозирования.

К оптимальным участкам для развертывания системы мониторинга с помощью ЦДТ и ИИ на территории Тюменской области можно отнести Тюменский и Тобольский участки ГОНС, на территории которых наблюдается высокая антропогенная нагрузка, интенсивная застройка, развитая инфраструктура и частые случаи проявления ЭГП. Также предпочтительно развертывание сети в речных долинах крупных рек области - Иртыша, Тобола,

Туры и Ишима, где наблюдается размыв берегов, который является предшественником ряда ЭГП. Немаловажными являются сельскохозяйственные территории и земли, занятые лесами, где также могут активизироваться опасные ЭГП, при мониторинге которых тоже целесообразно использование ЦДТ и ИИ.

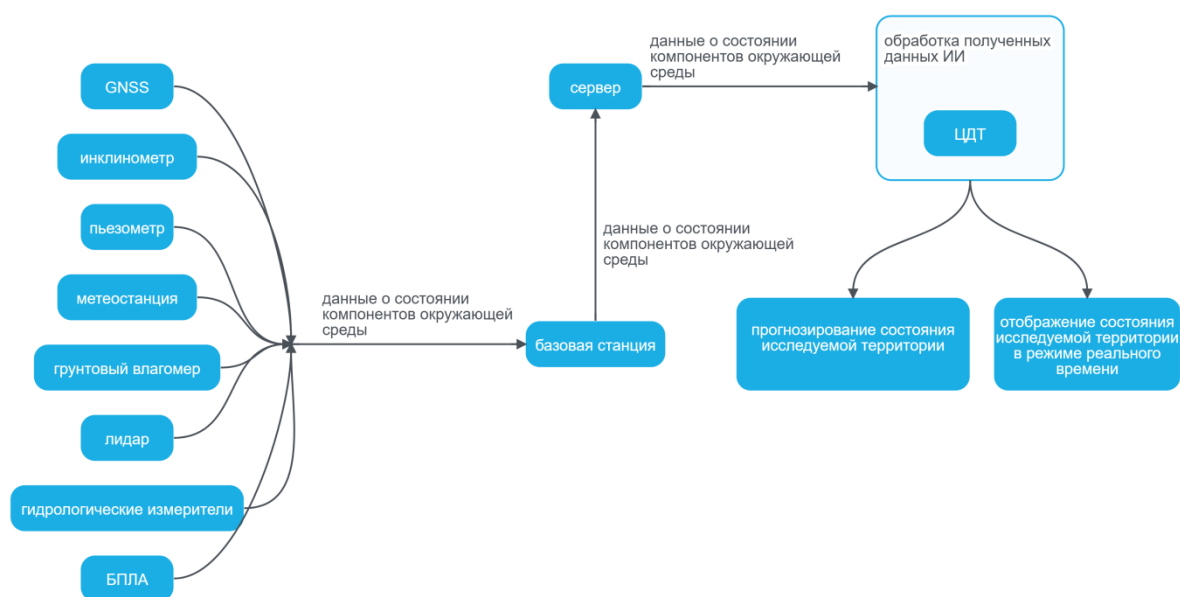
Для сбора данных состояния компонентов окружающей среды в рамках ЦДТ необходимо использовать такие технические средства, как:

- геодезические датчики GNSS, фиксирующие горизонтальные и вертикальные смещения грунтовых масс;
- инклинометры, определяющие угол наклона склонов;
- тензодатчики, фиксирующие напряжение в грунтах;
- пьезометры для фиксации изменения уровня грунтовых вод в пробуренной на участке исследования скважине;
- погодные метеорологические станции, фиксирующие количество атмосферных осадков, температуру и влажность атмосферного воздуха, и другие метеопараметры;
- грунтовые влагомеры для определения степени насыщения грунтов влагой;
- лидарные системы для лазерного сканирования рельефа с целью отслеживания его изменений и создания 3D-моделей исследуемой территории;
- приборы для измерения скорости течения и уровня воды в реках;
- БПЛА для аэрофотосъемки и дальнейшего создания ортофотопланов исследуемой территории.

Вышеперечисленные технические средства необходимо размещать в наиболее уязвимых для активизации ЭГП точках в пределах участка исследования – на бровках берегов, оврагов, стенках отрывов, телах оползней, склонах, объектах инфраструктуры в зоне активизации ЭГП.

Датчики будут объединяться в единую сеть с помощью радиосвязи, информация о состоянии компонентов окружающей среды будет передаваться через базовые станции на сервер, центр обработки данных или ГИС-платформу. В дальнейшем вся полученная информация поступает в ЦДТ, где они обрабатываются ИИ и отображаются в режиме реального времени. (Рис. 1)

При обработке полученных данных ИИ выполняет следующие действия: производит отсев ошибок, анализирует аномальные значения, сравнивает с историческими данными для выявления закономерностей и выявляет скрытые факторы, влияющие на активность ЭГП. По полученным данным ИИ сможет моделировать сценарии активизации ЭГП, выявлять зависимости между параметрами, отслеживать их изменения, оценивать тенденции развития ЭГП путем сравнения с историческими данными.



**Рис. 1.** Схема мониторинга ЭГП с использованием ЦДТ и ИИ.  
Составлено авторами

Стоит отметить и некоторые недостатки внедрения для обширной территории Тюменской области: потребуется создание либо нескольких ЦДТ, либо одной, которая будет покрывать всю исследуемую территорию. Это может быть затратно, как с экономической точки зрения, так и с точки зрения вычислительных мощностей. В случае, если вычислительных мощностей будет достаточно для обеспечения функционирования ЦДТ и ИИ, возникает проблема избыточного потребления электроэнергии, необходимой для поддержания их работы. Хотя и в настоящее время ИИ внедрен во многие сферы нашей жизни, все еще остается проблема его не идеальности, проявляющаяся в периодических ошибочных расчетах и неправильной интерпретации полученной информации. Полностью доверить весь процесс мониторинга ИИ не является целесообразным, необходимо использовать его как инструмент, который будет упрощать работу специалистам.

## Выводы

Применение ЦДТ и ИИ становится все более перспективным направлением для решения задач мониторинга состояния окружающей среды, включая ЭГП. Эти технологии позволяют значительно повысить точность выявления потенциальных угроз для окружающей среды и безопасности человека, а также обеспечить прогнозирование их развития.

Основные преимущества применения ЦДТ для мониторинга ЭГП заключается в возможности создания динамических цифровых копий физических объектов или систем, в нашем случае – участков наблюдения. При использовании ЦДТ появляется возможность получения данных о состоянии компонентов окружающей среды. Использование Интернета вещей при мониторинге ЭГП, а также многолетних данных дистанционного зондирования Земли позволяет получать актуальные данные состояния окружающей среды. Моделирование реальных условий состояния

участков наблюдения и прогнозирование его будущих изменений позволяет эффективно использовать ЦДТ.

ИИ позволяет обрабатывать большой массив данных, что в настоящее время цифровой трансформации всех сфер жизни, является большим преимуществом для выявления закономерностей на основе анализа и обучения по данным многолетнего мониторинга. При мониторинге экзогенных геологических процессов на территории Тюменской области, целесообразно использовать ЦДТ и ИИ.

### *Литература*

1. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Уральского федерального округа Российской Федерации за 2023 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://specgeo.ru/monitoring-sostoyaniya-nedr/gosudarstvennyu-monitoring-nedr-gmsn/production-info/>.
2. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2021 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://admtumen.ru/>.
3. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2022 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://admtumen.ru/>.
4. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2023 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://admtumen.ru/>.
5. Лисицкий Д. В., Осипов А. Г., Савиных В. Н. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 1. С. 206-212. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.
6. Митрофанов С. В., Минаев О. М., Масаева Л. М. Применение искусственного интеллекта для мониторинга экологического состояния водных ресурсов // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 12, № 10(151). С. 121-128. DOI 10.36871/ek.ur.p.r.2024.10.12.014.
7. Косулин В. В. Применение систем искусственного интеллекта в экологическом мониторинге выбросов предприятия // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 132-135.
8. Верзунов С. Н. Концепция интеллектуальной системы геоэкологического мониторинга // Проблемы автоматизации и управления. 2023. № 2(47). С. 91-108.
9. Создание "цифровых двойников" в рамках цифровой трансформации экологического мониторинга / В. С. Валиев, Д. В. Иванов, Д. Е. Шамаев, Р. Р. Хасанов // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 3(31). С. 29-33. DOI 10.24852/2411-7374.2022.3.30.34
10. Потапов В. П., Попов С. Е., Счастливец Е. Л. Цифровые двойники: стратегии и подходы к созданию систем экологического мониторинга // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 3. С. 167-181. DOI 10.25743/ICT.2023.28.3.010
11. Способы экологического мониторинга воздуха с применением технологических решений для их обработки и анализа, включая машинное обучение, искусственный интеллект и аналитику больших данных / Е. А. Виноградова, М. М. Дмитриев, А. С. Кудрявец, О. В. Савельева, Ю. А. Карло // Современные технологии: проблемы и тенденции развития. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2021. С. 174-189.
12. Мамаражабова Б. А., Шингисов А. У. Исследование современного применения искусственного интеллекта в экологическом мониторинге безопасности

- деятельности человека // Universum: технические науки. 2024. № 4-1(121). С. 20-22.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667962 Российская Федерация. Платформа DigiCity: № 2021667522: заявл. 08.11.2021: опубл. 08.11.2021 / М. В. Михелёв; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ПроЭнерджи".
  14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024681909 Российская Федерация. Программный комплекс для экологического мониторинга "Цифровой двойник городского озеленения": №2024680280: заявл. 03.09.2024: опубл. 16.09.2024 / П. А. Крупнов, Т. Г. Крупнова, О. В. Ракова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет».
  15. Ju, Luyu and Xiao, Te and He, Jian and Xu, Weifan and Xiao, Shihao and Zhang, Limin, A Simulation-Enabled Slope Digital Twin for Real-Time Assessment of Rain-Induced Landslide. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5037821> DOI: 10.2139/ssrn.5037821
  16. Liu, Xin & Wang, Yu. (2023). Sensing time-variant risk of rainfall-induced landslides using slope digital twins. - Conference: 14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP14) At: Dublin, Ireland, 2023
  17. Esomchukwu Chinagorom Igbokwe, Oliha Andrew. Potential for the Integration of Digital Twin and AI Technology in Gully Mapping and Prediction. International Journal of Engineering Research and Development, 2024, 20 (5), pp.199-207. hal-04601963
  18. Петров Ю. В. Роль территориальных банков данных в государственном управлении Тюменской области // Цифровая География. Том II. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. С. 73-76.
  19. Валеева К. Н., Петров Ю. В. Использование цифровых технологий для оценки ресурсообеспеченности Викуловского района Тюменской области // Цифровая география. Том I. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. С. 232-235.

A. A. Maltsev<sup>1</sup>  
Y. V. Petrov<sup>2</sup>

***Possibilities of application of digital twins of territories and artificial intelligence for monitoring of exogenous geological processes in the Tyumen Oblast***

<sup>1</sup> Tyumen State University, Tyumen  
e-mail: andriussmaltsev@yandex.ru

<sup>2</sup> Tyumen State University, Tyumen  
e-mail: petrov19811201@gmail.com

**Abstract.** The article considers the possibility of using digital twins of territories and artificial intelligence to monitor exogenous geological processes in the Tyumen Oblast. Exogenous geological processes have a significant negative impact on settlements, infrastructure and environment of the region. Traditional monitoring

*methods do not provide sufficient efficiency and accuracy in forecasting hazardous phenomena such as landslides, gully erosion and waterlogging. The introduction of digital twins of territories and artificial intelligence allows solving these problems by creating dynamic digital models of the studied territories, automating the collection and analysis of large volumes of data, and forecasting changes in real time. Examples of successful use of these technologies in Russia and abroad are given, and their advantages are emphasized, including a 20% increase in the accuracy of threat detection compared to traditional methods. For testing it is proposed to introduce digital twins of territories and artificial intelligence in the Tyumen and Tobolsk sections of the state observation network for exogenous geological processes, where there is a high anthropogenic load and frequent manifestations of hazardous processes. The results of the study demonstrate the promising use of modern technologies to improve the efficiency of monitoring exogenous geological processes, reduce risks for the population and ensure environmental safety.*

**Keywords:** digital twin of the territory, artificial intelligence, exogenous geological processes, environmental monitoring, Tyumen Region, landslide processes, gully erosion, geoinformation systems, Internet of Things.

### **References**

1. Information bulletin on the state of subsurface resources of the Ural Federal District of the Russian Federation for 2023. URL: <https://specgeo.ru/monitoring-sostoyaniya-nedr/gosudarstvennyy-monitoring-nedr-gmsn/production-info/>. (in Russian)
2. Report on the environmental situation in the Tyumen Oblast in 2021 URL: <https://admtymen.ru/>. (in Russian)
3. Report on the environmental situation in the Tyumen Oblast in 2022 URL: <https://admtymen.ru/>. (in Russian)
4. Report on the environmental situation in the Tyumen Oblast in 2023 URL: <https://admtymen.ru/>. (in Russian)
5. Lisitskiy D. V., Osipov A. G., Savinykh V. N. DIGITAL TERRITORY DIVINE AND METHODS OF GEOCOGNITIVE MODELING. Interexpo Geo-Siberia, 2022, vol. 1, pp. 206-212. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212. (in Russian)
6. Mitrofanov, S. V. Application of artificial intelligence for monitoring the ecological state of water resources / S. V. Mitrofanov, O. M. Minaev, L. M. Masaeva // Economics and Management: problems, solutions. 2024. T. 12, № 10(151). C. 121-128. DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.10.12.014. EDN KVKHFG. (in Russian)
7. Kosulin, V. V. Application of artificial intelligence systems in environmental monitoring of enterprise emissions / V. V. Kosulin // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2023. № 10. C. 132-135. EDN XVWZNK. (in Russian)
8. Verzunov S. N. Concept of the intellectual system of geoecological monitoring / S. N. Verzunov // Problems of automation and control. 2023. № 2(47). C. 91-108. EDN ZXUMLR. (in Russian)
9. Creation of “digital twins” within the digital transformation of environmental monitoring / V. S. Valiev, D. V. Ivanov, D. E. Shamaev, R. R. Khasanov // Russian Journal of Applied Ecology. 2022. № 3(31). C. 29-33. DOI 10.24852/2411-7374.2022.3.30.34. EDN XTLYUW. (in Russian)

10. Potapov V. P. Digital twins: strategies and approaches to the creation of environmental monitoring systems / V. P. Potapov, S. E. Popov, E. L. Schastlivtsev // Computational Technologies. 2023. T. 28, № 3. С. 167-181. DOI 10.25743/ICT.2023.28.3.010. EDN ZJIUPZ. (in Russian)
11. Methods of environmental air monitoring using technological solutions for their processing and analysis, including machine learning, artificial intelligence and big data analytics / E. A. Vinogradova, M. M. Dmitriev, A. S. Kudryavets [et al.] // Modern technologies: problems and trends of development: a monograph. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "New Science" (IP Ivanovskaya I.I.), 2021. С. 174-189. EDN FKJEWI. (in Russian)
12. Mamarazhabova B. A. Research of modern application of artificial intelligence in ecological monitoring of human activity safety / B. A. Mamarazhabova, A. U. Shingisov // Universum: Technical Sciences. 2024. № 4-1(121). С. 20-22. EDN NEIRTC.
13. Certificate of state registration of computer program No. 2021667962 Russian Federation. DigiCity platform: No. 2021667522: applied. 08.11.2021: published 08.11.2021 / M. V. Mikhelev; applicant Limited Liability Company "ProEnergy". - EDN OOLCBO. (in Russian)
14. Certificate of state registration of computer program No. 2024681909 Russian Federation. Program complex for ecological monitoring "Digital twin of urban greenery. No. 2024680280: applied. 03.09.2024: published on 16.09.2024 / P. A. Krupnov, T. G. Krupnova, O. V. Rakova; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University". - EDN GYWGWI. (in Russian)
15. Ju, Luyu and Xiao, Te and He, Jian and Xu, Weifan and Xiao, Shihao and Zhang, Limin, A Simulation-Enabled Slope Digital Twin for Real-Time Assessment of Rain-Induced Landslide. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5037821> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5037821>
16. Liu, Xin & Wang, Yu. (2023). Sensing time-variant risk of rainfall-induced landslides using slope digital twins. - Conference: 14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP14) At: Dublin, Ireland, 2023.
17. Esomchukwu Chinagorom Igbokwe, Oliha Andrew. Potential for the Integration of Digital Twin and AI Technology in Gully Mapping and Prediction. International Journal of Engineering Research and Development, 2024, 20 (5), pp.199-207. hal-04601963
18. Petrov Yu. V. Rol' territorial'nyh bankov dannyh v gosudarstvennom upravlenii Tyumenskoj oblasti. Cifrovaya Geografiya. Tom II. Perm': Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet, 2020. S. 73-76.
19. Valeeva K. N., Petrov Yu. V. Ispol'zovanie cifrovyyh tekhnologij dlya ocenki resursoobespechennosti Vikulovskogo rajona Tyumenskoj oblasti // Cifrovaya geografiya. Tom I. Perm': Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet, 2020. S. 232-235.

*Поступила в редакцию 10.02.2025 г.*