

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОТВАЛООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Е. Н. Грищенко¹, Ю. И. Кутепов¹, Н. А. Кутепова¹, А. Д. Васильева¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
199106, Россия (Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
e-mail: ekgr.mail@gmail.com)

Аннотация: В статье представлен методический подход к построению экспертной информационно-аналитической системы, предназначенной для обеспечения безопасности формирования и функционирования отвалов при разработке месторождений полезных ископаемых. Предложенная структура системы включает четыре взаимосвязанных раздела – анализ, изучение, прогнозирование и мониторинг, охватывающих весь цикл обработки инженерных, геомеханических и мониторинговых данных. Подход базируется на принципах интеграции нормативных требований, результатов инженерных изысканий, эмпирических зависимостей и адаптивных алгоритмов анализа. Особое внимание уделено механизму логического вывода и формированию агрегированной оценки устойчивости, что позволяет учитывать неопределенность исходных данных и обосновывать инженерные решения. Разработанный подход может быть положен в основу цифровой платформы поддержки принятия решений в области горно-технической безопасности и прошел предварительную верификацию на базе пилотных данных инженерных проектов.

Ключевые слова: Отвальные горнотехнические сооружения, устойчивость, промышленная безопасность, экспертная система, интеллектуальный анализ данных, инженерные изыскания, прогнозирование параметров, мониторинг, машинное обучение.

Для цитирования: Грищенко Е. Н., Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Васильева А. Д. Методический подход к формированию экспертной системы обеспечения безопасности отвалообразования при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 96–112. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_96.

A methodological approach to the formation of an expert system for ensuring the safety of landfilling during open-pit mining of mineral deposits

E. N. Grishchenkova¹, Yu I. Kutepov¹, N. A. Kutepova¹, A. D. Vasilieva¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: This article presents a methodological approach for developing an expert information-analytical system aimed at ensuring the safety of waste dump formation and operation during the development of mineral deposits. The proposed structure comprises four interrelated parts – analysis, study, forecasting, and monitoring – covering the entire cycle of processing engineering, geomechanical, and monitoring data. The approach is based on the integration of regulatory requirements, results of engineering surveys, empirical dependencies, and adaptive analytical algorithms. Particular attention is given to the logic of inference and the formation of an aggregated stability assessment, which allows for consideration of data uncertainty and justification of engineering decisions. The developed approach can serve as a foundation for a digital decision support platform in the field of mining safety and has undergone preliminary verification using pilot engineering project data.

Key words: mine engineering structures, stability, industrial safety, expert system, intelligent data analysis, engineering surveys, parameter forecasting, monitoring, machine learning.

For citation: Grishchenkova E. N., Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Vasilieva A. D. A methodological approach to the formation of an expert system for ensuring the safety of landfilling during open-pit mining of mineral deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):96–112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_96.

Введение

Современные масштабы горнодобывающей деятельности сопровождаются формированием сложных природно-технических систем размещения отходов, таких как водонасыщенные отвалы вскрышных пород [1–3], хвостохранилища [4], шламохранилища [5], золоотвалы [6] и другие. Устойчивость данных объектов характеризует их состояние [7–9], определяющее промышленную и экологическую безопасность горнопромышленных регионов [10–12]. Традиционные подходы к проектированию и мониторингу отвальных сооружений демонстрируют ряд существенных ограничений, связанных со сложностью прогнозирования их поведения в условиях динамично изменяющихся природных и техногенных факторов [13–15].

Основные проблемы обеспечения безопасности объектов размещения горнопромышленных отходов заключаются в следующем:

- высокая неопределенность долгосрочных прогнозов их устойчивости;
- сложность учета взаимовлияния различных факторов (инженерно-геоло-

гических, гидрогеологических, геомеханических, климатических);

- трудоемкость обработки и интеграции больших массивов разнородных данных мониторинга;
- недостаточная эффективность существующих нормативных подходов к оценке устойчивости [16].

Особую актуальность приобретает задача разработки адаптивных систем управления безопасностью, способных оперативно реагировать на изменения состояния объектов в процессе их эксплуатации. Классические подходы к оценке устойчивости, основанные на методах предельного равновесия или численном моделировании, не всегда учитывают динамику взаимодействия техногенных и природных факторов. Кроме того, существующие нормативные коэффициенты запаса (1.3–1.4) зачастую оказываются недостаточными для обеспечения устойчивости высоких отвальных сооружений, широко распространенных в современной практике, на глинистом основании, особенно в условиях развития нестационарных гидрогеомеханических процессов, при длительном сроке их эксплуатации.

В этом контексте применение технологий искусственного интеллекта и автоматизированных систем обработки данных открывает новые перспективы для решения указанных проблем. Современные цифровые технологии, включая машинное обучение, нейросетевые модели, геоинформационные системы и распределенные сети наблюдательных скважин с датчиками смещений или давления, позволяют:

- осуществлять комплексный анализ больших массивов данных [17, 18];
- выявлять скрытые закономерности, характерные для конкретного наблюдаемого природно-технического объекта;
- строить предиктивные модели изменения как в целом устойчивости, так и отдельных компонентов (порового давления, скоростей смещений) [19, 20];
- оперативно корректировать параметры эксплуатации.

Особое значение имеет разработка интегрированных платформ, объединяющих возможности численного моделирования, анализа данных и поддержки принятия решений [21–23]. Такие системы способны существенно повысить эффективность управления безопасностью объектов размещения горнопромышленных отходов на всех этапах их жизненного цикла — от проектирования до рекультивации.

Развитие цифровых технологий открывает новые возможности для построения интеллектуальных платформ, предназначенных для комплексного анализа, моделирования и управления инженерными объектами [24–26]. К числу таких технологий относятся машинное обучение (Machine Learning, ML) [27–29], большие языковые модели (Large Language Models, LLM) [30, 31], модели поисковой дополненной генерации (Retrieval-Augmented Generation, RAG) [32, 33], геоинформационные системы (ГИС) [34], технологии пространственного моделирования, циф-

ровые двойники [35, 36] и облачные вычисления. В контексте исследуемой темы, интеграция перечисленных технологий в состав разрабатываемых систем позволяет не только обрабатывать большие объемы разнородных инженерных и мониторинговых данных, но и создавать обоснованные рекомендации по устойчивости и технологии формирования отвалов, обеспечивая поддержку принятия решений практически в режиме реального времени.

Эти технологические решения составляют основу для нового поколения аналитических инструментов, способных не только обрабатывать большие объемы данных, но и поддерживать принятие решений в инженерной практике. В условиях высокой неопределенности и необходимости оперативного реагирования на изменения состояния объектов все большую актуальность приобретают экспертные системы, интегрирующие логические и алгоритмические механизмы анализа. Одним из перспективных направлений является разработка гибридных экспертных систем, сочетающих формализованные инженерные знания, эмпирические закономерности и методы интеллектуальной обработки данных. Такие системы позволяют преобразовывать разнородную информацию в структурированные рекомендации, адаптированные к конкретным условиям эксплуатации. За счет своей универсальности и способности к адаптации они обеспечивают интерпретируемость выводов, учет отраслевой специфики и возможность масштабирования под различные горнотехнические задачи.

Данная работа направлена на формирование методической и концептуальной основы экспертной системы обеспечения безопасности горнотехнических сооружений при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Предложенный подход обеспечивает интеграцию

инженерных данных, интеллектуальный анализ и формирование рекомендаций по обеспечению устойчивости и промышленной безопасности горнотехнических сооружений, формируемых при открытой добыче полезных ископаемых, и реализует комплексный подход для интеллектуальной поддержки принятия решений.

Методология и архитектура системы

В основе формирования экспертного подхода к обеспечению устойчивости

отвальных сооружений лежит разработанная авторами данной статьи система научно-методического обеспечения безопасности отвалообразования (таблица).

Данная система представляет собой структурированную модель организации научно-методического сопровождения всех этапов формирования и функционирования горнотехнических объектов — отвалов, гидроотвалов и пр. Методическая основа системы обеспечения безопасности включает четыре взаимосвязанных раздела работ и исследований

Структура системы научно-методического обеспечения безопасности отвалообразования при открытой разработке МПИ [составлено авторами]

The structure of the scientific and methodological safety assurance system for landfilling during the open development of MPI [compiled by the authors]

<i>Разделы исследований и их содержание</i>			
Анализ	Изучение	Прогнозирование	Мониторинг
Действующая нормативная база — требования к изучению, прогнозу и мониторингу	Геодезическая съемка	Геометрическая (геодезическая) модель	Деформационный
Случаи нарушения устойчивости на месторождении (объекте)	Инженерно-геологические изыскания	Инженерно-геологическая модель	Сейсмический
Основные определяющие факторы	Гидрогеологическое изучение	Гидрогеологическая модель	Инженерно-геологический
Инженерно-геологические и гидрогеологические условия месторождения	Обратные расчеты по произошедшим случаям нарушения устойчивости отвалов	Геомеханическая (гидрогеомеханическая) модель	Гидрогеологический
Существующие геомеханические модели прочности и деформационного поведения пород	Специальные геомеханические исследования — опытно-эксплуатационные, научно-исследовательские	Оценка и прогноз устойчивости откосов отвалов, а также, при необходимости, прогноз уплотнения	Геомеханический (гидрогеомеханический)
Установленные ранее закономерности изменения параметров сооружений			Технологический мониторинг
Применяемые на месторождении технологии отвалообразования			
Обоснование оптимальных параметров отвалов			
Определение оптимальной технологии отвалообразования			

(«Анализ», «Изучение», «Прогнозирование» и «Мониторинг»), охватывающих полный цикл получения и обработки исходных данных, построения моделей, оценки устойчивости и обеспечения безопасности. Каждый из разделов включает подразделы, соответствующие действующим нормативным требованиям, практике инженерных изысканий и современным подходам к геомеханическому анализу. Результатом работы системы является обоснование оптимальных параметров и технологии отвалообразования.

Раздел «Анализ»

Раздел «Анализ» является исходной точкой разработанной системы обеспечения устойчивости отвалов и направлен на выявление, сбор и систематизацию информации, определяющей условия эксплуатации отвалов. Цель данного раздела заключается в формировании комплексного представления о природных и техногенных условиях, определяющих устойчивость конкретного отвального сооружения, путем анализа нормативной документации, результатов инженерных изысканий и накопленного опыта эксплуатации аналогичных объектов на конкретном предприятии, в регионе и отрасли.

Ключевыми направлениями данного раздела являются:

- анализ нормативной базы, регламентирующей порядок проведения инженерных изысканий, проектирования, прогнозирования и мониторинга устойчивости откосов отвальных массивов;
- обработка данных о случаях нарушения устойчивости, включая технические отчеты, экспертные заключения и материалы, позволяющие выявить типовые для данных условий сценарии развития аварийных ситуаций, оценить последствия и выделить повторяющиеся причины потерь устойчивости;

- идентификация определяющих факторов, влияющих на устойчивость отвала: литологический состав, стратиграфия, физико-механические свойства пород, климатические условия, способ формирования и т.д.;

- оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий месторождения, включая глубину залегания, степень обводненности, наличие водоносных горизонтов, характер дренажа, тектонические нарушения и прочие параметры, влияющие на устойчивость массивов;

- изучение существующих геомеханических моделей, которые применялись при проектировании и эксплуатации отвалов, а также зависимостей, описывающих поведение массива при различных нагрузках;

- систематизация ранее установленных закономерностей изменения параметров аналогичных сооружений, выявленных в процессе длительного наблюдения или при обработке архивных данных;

- анализ применяемых на объекте технологий отвалообразования, включая последовательность и способ отсыпки, наличие поэтапного уплотнения, конструктивные решения и средства механизации.

Раздел «Анализ» служит базой для формирования исходного поля параметров, необходимых для построения инженерно-геологических и геомеханических моделей, а также обеспечения комплексного представления о природных и техногенных условиях формирования отвалов.

Раздел «Изучение»

Раздел «Изучение» направлен на систематизацию, интерпретацию и уточнение инженерных и геологических данных, полученных в результате полевых, лабораторных и дистанционных исследований. Этот раздел обеспечи-

вают формирование исходных цифровых моделей геологической среды и напряженно-деформированного состояния массива, необходимых для расчетов устойчивости и пространственного анализа условий отвалообразования. Методическая суть данного раздела заключается в формировании целостного представления о текущем состоянии массива, включая структуру, физико-механические свойства пород, гидрогеологическую обстановку и характеристики взаимодействия с техногенными элементами.

В рамках раздела выделяются следующие ключевые направления:

- геодезическая съемка, обеспечивающая получение актуальных данных о конфигурации откосов, рельефе основания, объемах насыпных пород, изменении положения границ и характере деформаций;

- инженерно-геологические изыскания, включающие полевые и лабораторные испытания и исследования, на основе которых строятся разрезы, уточняются физико-механические свойства грунтов и устанавливаются закономерности их изменения при воздействии различных факторов;

- гидрогеологическое изучение, направленное на оценку степени обводнения отвалов, проницаемости техногенного массива, гидродинамического режима подземных вод, порового давления в глинистых грунтах;

- обратные расчеты по случаям нарушения устойчивости, позволяющие по имеющимся последствиям (деформациям, оползням) ретроспективно оценить поведение массива и уточнить ключевые параметры моделей;

- специальные геомеханические исследования, включая опытно-эксплуатационные наблюдения, промышленные эксперименты, мониторинг экспериментальных участков и научно-исследовательские работы.

Результаты, полученные в данном разделе, служат основой для формирования инженерно-геологических, гидрогеологических и геомеханических моделей, необходимых для последующего анализа устойчивости отвальных сооружений. Систематизация и интерпретация этих данных способствуют уточнению расчетных условий, повышению достоверности выводов, подготовке к последующим этапам прогнозирования и мониторинга.

Раздел «Прогнозирование»

Раздел «Прогнозирование» направлен на оценку текущего состояния устойчивости отвалов и формирование прогноза ее изменения на основе интеграции инженерных, геомеханических и гидрогеологических данных. Методическая задача данного раздела — использование расчетных моделей и алгоритмов анализа для выявления потенциально опасных зон, определения параметров деформаций и формулирования рекомендаций по безопасному ведению отвалообразования.

Прогнозирование базируется на построении и интерпретации следующих моделей отвала:

- геометрическая (маркшейдерско-геодезическая) модель — цифровое представление его пространственной формы, создаваемое на основе данных маркшейдерско-геодезических измерений;

- инженерно-геологическая модель — пространственное отображение инженерно-геологических элементов, их границы и физико-механические характеристики пород;

- гидрогеологическая модель — цифровое отображение взаимодействия поверхностных и подземных вод и фильтрационных процессов в теле отвала (пьезометрические уровни и напоры действующих водоносных горизонтов, распределение порового давления);

• геомеханическая (гидрогеомеханическая) модель — математическое представление его деформационного поведения (изменения напряжённо-деформированного состояния) под действием собственного веса, фильтрационных процессов, внешних нагрузок, горнотехнических факторов и природных воздействий (сейсмика, осадки).

На основе анализа результатов, полученных из расчетных моделей, формируется прогноз поведения отвального массива во времени, с учетом сценариев нагружения, возможных техногенных и природных воздействий. Прогноз включает расчет коэффициента устойчивости, оценку деформаций, вероятностный анализ рисков, а при необходимости — прогноз уплотнения пород и остаточных смещений. Раздел «Прогнозирование» играет важную роль в принятии инженерных решений, позволяет заблаговременно идентифицировать потенциально нестабильные участки и своевременно скорректировать параметры отвалообразования с учетом расчетных сценариев.

Раздел «Мониторинг»

Данный раздел направлен на непрерывное наблюдение за состоянием отвальных массивов и прилегающих участков с целью оперативного выявления изменений, способных повлиять на устойчивость. Он обеспечивает обратную связь в системе обеспечения безопасности, позволяя сопоставлять расчетные модели с фактическими данными и, при необходимости, своевременно реализовать превентивные мероприятия. С методической точки зрения, мониторинг представляет собой интеграцию данных различной природы — геодезической, геофизической, сейсмической, инженерной и технологической — поступающих как в режиме периодического контроля, так и в режиме, близком к реальному времени.

Основные направления мониторинга включают:

• Деформационный мониторинг, направленный на измерение горизонтальных и вертикальных смещений отвальных сооружений с использованием геодезических и тензометрических методов, а также методов радарной интерферометрии;

• **Сейсмический мониторинг** — это система регулярных наблюдений за сейсмическими событиями естественного и искусственного происхождения;

• Инженерно-геологический мониторинг включает уточнение геологического строения, состояния и физико-механических свойств техногенных и естественных пород;

• Гидрогеологический мониторинг, обеспечивающий контроль уровней и напоров водоносных горизонтов в основании и теле отвала, развивающегося при нагружении массивов избыточного порового давления и направлений фильтрации;

• Геомеханический мониторинг — это комплекс методов и средств, направленных на получение оперативной информации о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород и устойчивости откосов;

• Технологический мониторинг контролирует соблюдение проектных технологий и параметров отвалообразования — высот отвала и ярусов, углов ярусов и откоса, способов укладки, очередности отсыпки слоев, интенсивности отсыпки и пр.

В дополнение к функциям контроля, раздел «Мониторинг» служит источником данных для уточнения прогнозных моделей и обеспечивает своевременное выявление отклонений от расчетных сценариев, а также позволяет оперативно реагировать на возникающие риски при формировании и эксплуатации отвалов.

Структура и механизм работы экспертной системы

Функционирование разработанной экспертной системы базируется на комплексном подходе к интерпретации инженерных, геологических и мониторинговых данных, направленном на обеспечение устойчивости отвальных сооружений. Методическая основа системы сочетает формализованные знания, логические зависимости и механизмы адаптации на основе накопленного опыта, что позволяет учитывать множество разнородных факторов при принятии инженерных решений.

Ключевая идея состоит в объединении различных источников информации — нормативной документации, результатов изысканий, данных наблюдений, расчетных моделей и экспертных оценок — в единую аналитическую структуру. Это достигается благодаря построению системы признаков, отражающих текущее состояние объекта, и сопоставлению этих признаков с типовыми сценариями и условиями устойчивого отвалообразования.

Экспертная система использует двухуровневый механизм разработки рекомендаций. На первом уровне применяется логический вывод на основе заранее заданных правил, сформулированных с учетом нормативов и инженерной практики. На втором — задействуются адаптивные методы, способные уточнять значимость параметров, выявлять взаимосвязи и ранжировать рекомендации на основе реальных наблюдений и ретроспективных данных. Такой подход позволяет учитывать не только предписанные зависимости, но и эмпирически подтвержденные закономерности поведения массива в конкретных условиях.

Дополнительно в системе выделяются уровни безопасности, формируемые на основе текущих и прогнозных

значений параметров. При этом учитывается уровень достоверности исходных данных, который зависит от полноты наблюдений, качества замеров и характера источника информации. Логический блок сопоставляет параметры с нормативными и эмпирическими зависимостями, а при низкой достоверности данных система предлагает более консервативные варианты решений.

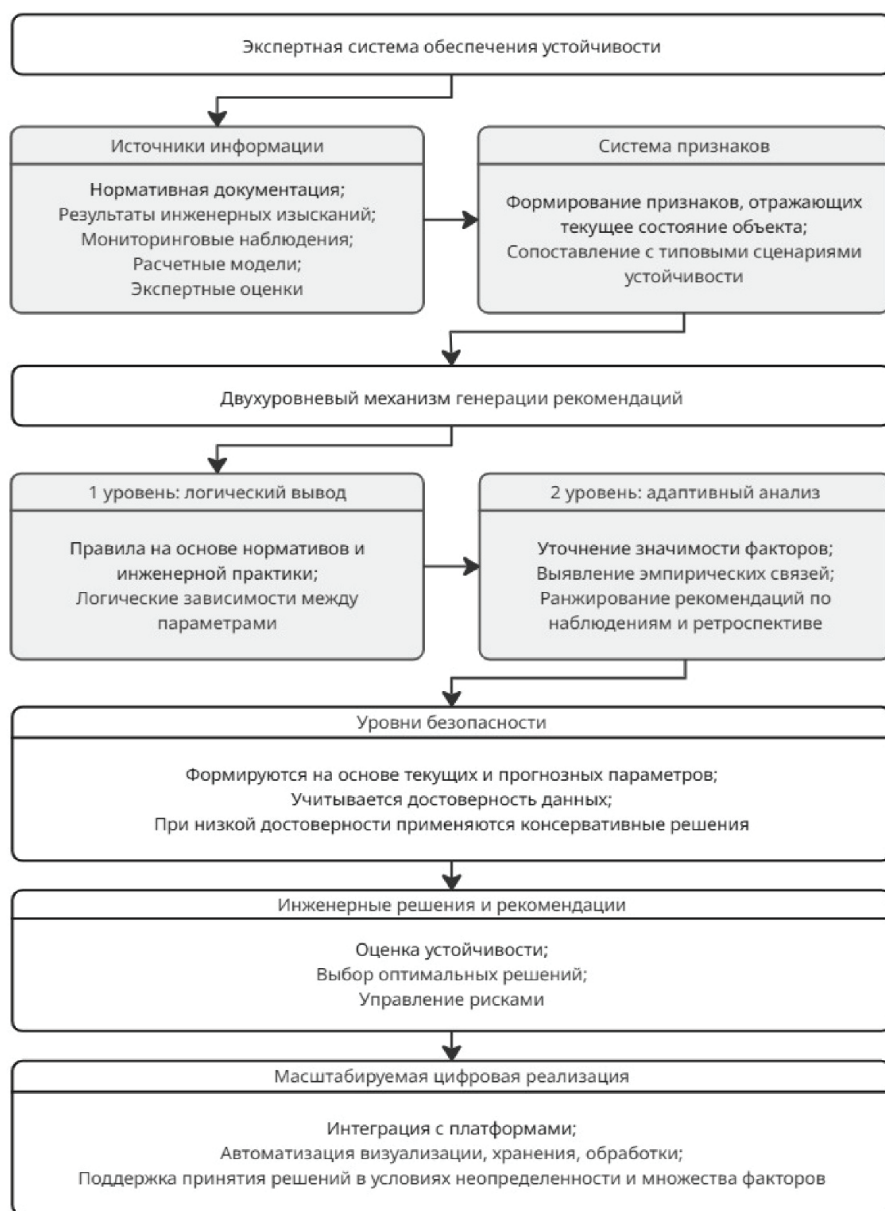
Закладываемая структура обеспечивает масштабируемость и гибкость — как с точки зрения включения новых факторов и источников информации, так и в плане последующей цифровой реализации. В дальнейшем методология может быть интегрирована в специализированные инженерные платформы, обеспечивающие визуализацию, хранение и обработку информации в автоматизированном режиме. При этом основой таких решений остается экспертная поддержка, которая представляет собой инструмент принятия обоснованных решений в условиях неопределенности, множественности факторов и ограниченности наблюдаемых данных.

Структура и механизм работы экспертной системы представлены на рисунке.

Интеграция компонентов и реализация системы

Представленный методический подход к экспертной оценке устойчивости отвальных сооружений обладает потенциалом к последующей реализации в виде специализированной цифровой платформы, которая станет инструментом поддержки инженерных решений, обеспечивая систематизацию данных, автоматизацию анализа и оперативное формирование рекомендаций на всех этапах жизненного цикла отвала.

Концепция построения платформы предполагает модульную архитектуру, отражающую четыре ключевых раздела



*Структура и механизм работы экспертной системы [составлено авторами]
The structure and mechanism of the expert system [compiled by the authors]*

методического обеспечения: анализ, изучение, прогнозирование и мониторинг. Каждый из модулей будет представлять собой логически завершённый блок, ориентированный на работу с соответ-

ствующими видами инженерной информации и экспертными сценариями.

В рамках такой реализации могут быть использованы современные цифровые технологии, включая:

- алгоритмы машинного обучения (Machine Learning) для обработки накопленных данных и повышения точности прогнозов;

- большие языковые модели (Large Language Models, LLM) для интерпретации текстовой информации и поддержки интеллектуального поиска;

- модели поисковой дополненной генерации (Retrieval-Augmented Generation, RAG) для автоматической генерации инженерных заключений на основе архивных документов;

- геоинформационные системы (ГИС) и технологии пространственного моделирования для отображения инженерной обстановки;

- цифровые двойники и облачные вычисления для интеграции с полевыми источниками данных и моделями в реальном времени.

Цифровая реализация, базирующаяся на предложенном методическом подходе, позволит не только повысить оперативность и обоснованность принимаемых решений, но и создать основу для тиражируемого инструмента управления инженерной безопасностью на объектах горнопромышленного комплекса.

Результаты работы

В работе представлена концепция экспертной системы, предназначенной для поддержки принятия инженерных решений в области обеспечения устойчивости отвалов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Разработанная методическая структура объединяет разделы анализа, изучения, прогнозирования и мониторинга, охватывая полный цикл получения, интерпретации и использования инженерной информации для оценки безопасности отвалных сооружений.

Представленный методический подход предусматривает интеграцию нормативных требований, результатов

инженерно-геологических изысканий, геомеханических моделей, данных мониторинга и экспертных оценок в единую аналитическую систему. Предложенный подход обеспечивает возможность формализованной обработки разнородных источников информации, выявления причинно-следственных связей между параметрами и формирования обоснованных рекомендаций по параметрам и технологии отвалообразования.

Также уделено внимание механизму логического вывода и агрегированной оценки уровня безопасности, позволяющим учитывать не только текущие параметры, но и их динамику, а также уровень достоверности исходных данных. Это является важным для принятия решений в условиях высокой неопределенности, ограниченности наблюдений и множественности влияющих факторов.

Предложенная архитектура может быть использована как основа для последующей цифровой реализации экспертной системы в виде специализированной инженерной платформы. Такая реализация обеспечит:

- сокращение времени обработки данных в 2–4 раза по сравнению с традиционными методами за счет автоматического сбора, фильтрации и сопоставления инженерных, геомеханических и мониторинговых данных, а также использования алгоритмов машинного обучения для ускоренной обработки и интеллектуальной интерпретации информации;

- увеличение объема и глубины анализируемой информации, расширение набора учитываемых параметров в 2–3 раза и более, включая динамические и пространственные характеристики, что повышает полноту оценки состояния объекта;

- повышение согласованности и воспроизводимости экспертных оценок, что выражается в повышении количества

совпадений между независимыми экспертами до 90% благодаря формализованным правилам логического вывода и единым алгоритмам расчетов;

- наглядное представление результатов с использованием интерактивных панелей и ГИС-интеграции с сокращением времени интерпретации и подготовки отчетов с нескольких часов до 10–30 минут;

- оперативное реагирование и автоматическая генерация уведомлений при выходе параметров за допустимые пределы в течение 5–10 минут после поступления новых данных мониторинга;

- масштабируемость и тиражируемость подхода к различным объектам и условиям эксплуатации;

- применение интеллектуальных алгоритмов и моделей машинного обучения, обеспечивающих адаптацию системы к изменяющимся условиям.

Заключение

Разработанный методический подход успешно прошел предварительную верификацию на базе реальных инженерных данных и был дважды представлен на Международном научно-практическом форуме «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий:

Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2024 и 2025 гг.).

Полученные результаты демонстрируют высокую степень готовности предложенной системы к прикладному использованию и ее потенциал как инструмента цифровизации процессов обеспечения устойчивости горнотехнических объектов.

Вклад авторов:

Грищенкова Е. Н., канд. техн. наук — разработка экспертной системы обеспечения устойчивости отвалообразования, описание логики формирования рекомендаций и агрегированной оценки, подготовка текста статьи.

Кутепов Ю. И., проф., докт. техн. наук — обоснование состава работ и структуры системы обеспечения безопасности, постановка цели, задач и написание текста статьи.

Кутепова Н. А., докт. техн. наук — обоснование экспертной системы обеспечения безопасности, написание текста статьи.

Васильева А. Д., канд. техн. наук — обоснование экспертной системы обеспечения безопасности, написание текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В.* Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 49–52. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.09.

2. *Кутепов Ю. Ю.* Гидрогеомеханическое обоснование устойчивости бортов карьеров при размещении в них жидких промышленных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № 9. — С. 65–77. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_65.

3. *Павлович А. А., Хорева А. Ю.* Определение прочностных свойств отвальной массы для оценки устойчивости откосов отвалов // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 55–61. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08.

4. *Калашник Н. А.* Влияние степени водонасыщенности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы: 3D-моделирование // Горный информационно-аналитический

бюллетень (научно-технический журнал). — 2025. — № 5. — С. 144–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_144.

5. *Журавков М. А., Кологривко А. А., Кузьмич В. А., Николайчик М. А.* Создание блочной геомеханической модели отработанного шламохранилища в горно-геологической информационной системе Micromine Origin & Beyond // Горная механика и машиностроение. — 2023. — № 1. — С. 13–22.

6. *Чукаева М. А., Матвеева В. А., Сверчков И. П.* Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 97–104. DOI: 10.31897/PMI.2022.5.

7. *Бахаева С. П., Тур К. А., Илюшкин В. Д.* Геомеханическое обоснование устойчивости отвала при совместном складировании вскрышных песчано-глинистых пород и отходов обогащения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2020. — № 4(140). — С. 49–59. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-49-59.

8. *Кутепова Н. А., Мосейкин В. В., Кондакова В. Н., Поспехов Г. Б., Страупник И. А.* Особенности инженерно-геологических свойств отходов углеобогащения в связи с их складированием // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 12. — С. 77–93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.

9. *Жабко А. В., Волкоморова Н. В., Жабко Н. М.* Расчет устойчивости отвалов на слабом наклонном контакте // Известия Уральского государственного горного университета. — 2021. — № 1. — С. 87–101. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-87-101.

10. *Пашкевич М. А., Данилов А. С.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 153–154.

11. *Семячков А. И., Почечун В. А., Семячков К. А.* Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 168–179. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.

12. *Пашкевич М. А., Алексеенко А. В., Нуреев Р. Р.* Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.

13. *Шабаров А. Н., Куранов А. Д.* Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 5–34. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01.

14. *Кутепов Ю. Ю., Карасев М. А.* Изучение и прогноз уплотнения фосфогипса в отвалах для обоснования их вместимости // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 61–67. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09.

15. *Соколовский А. В., Гончар Н. В.* Оценка направлений использования техногенных ресурсов при отработке различных видов минерального сырья // Горная промышленность. — 2023. — № 5. — С. 102–107.

16. *Макаров А. Б., Ливинский И. С., Спирин В. И., Павлович А. А.* Управление устойчивостью бортов карьеров как основа обеспечения ответа на глобальные вызовы // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2021. — № 3. — С. 188–202. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-182-196.

17. *Рыльникова М. В., Клебанов Д. А., Рыбин В. В., Розанов И. Ю.* Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных // Горная промышленность. — 2024. — № 4. — С. 121–128. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-121-128.

18. *Рождественская И. А., Завалько Н. А., Лукичев К. Е., Зубенко А. В., Лаффах А. М.* Применение технологий больших данных для повышения устойчивости и эффективности угольной промышленности в условиях цифровой трансформации отрасли // Уголь. — 2025. — № 1. — С. 82–92. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-82-92.

19. Егоров Н. А., Фокин И. В., Дубиня Н. В. Прогноз поведения напряженно-деформируемого состояния образцов горных пород при помощи рекуррентной нейронной сети // Наука и технологические разработки. — 2024. — Т. 103. — № 2. — С. 59–74. DOI: 10.21455/std2024.2–4.

20. Красюкова Н. Л., Панина О. В., Еремин С. Г., Зубенко А. В., Лаффах А. М. Интеллектуальное прогнозирование смещения грунта с использованием параллельных нейросетевых моделей и высокоточных геодезических измерений // Горная промышленность. — 2025. — № 2. — С. 106–112. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-106–112.

21. Григорюк А. П., Брагинская Л. П., Семинский И. К., Семинский К. Ж., Ковалевский В. В. Цифровая платформа для интеграции и анализа данных геофизического мониторинга Байкальской природной территории // Электронные библиотеки. — 2022. — Т. 25. — № 4. — С. 303–316. DOI: 10.26907/1562-5419-2022-25–4-303–316.

22. Непша Ф. С., Красильников М. И., Перевалов К. В. Применение цифровой платформы для построения интеллектуальных систем управления энергоснабжением предприятий горной промышленности // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2021. — № 5. — С. 26–34.

23. Зеньков И. В., Кустикова Е. А., Ле Хунг Ч., Сильванович О. В., Юронен Ю. П., Маглинец Ю. А., Раевич К. В., Герасимова Е. И., Миронова Ж. В., Скорнякова С. Н. Цифровая платформа в решении задач экологии нарушенных земель для горнодобывающих предприятий с открытыми горными работами на основе ресурсов дистанционного зондирования и искусственного интеллекта // Экология и промышленность России. — 2024. — Т. 28. — № 1. — С. 52–57. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-1-52–57.

24. Гуман О. М., Макаров А. Б., Антонова И. А., Вегнер-Козлова Е. О. Цифровые технологии в системе мониторинга окружающей среды на месторождениях твердых полезных ископаемых // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 2. — С. 97–102. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-97–102.

25. Рылников А. Г., Пыталев И. А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 470–481. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1–470–481.

26. Joseph Mwanza, Peter Mashumba, Arnesh Telukdarie. A Framework for Monitoring Stability of Tailings Dams in Realtime Using Digital Twin Simulation and Machine Learning // Procedia Computer Science. 2024, vol. 232, pp. 2279–2288. DOI: 10.1016/j.procs.2024.02.047.

27. Xiaoying Zhuang, Yuhang Liu, Yuwen Hu, Hongwei Guo, Binh Huy Nguyen. Prediction of rock fracture pressure in hydraulic fracturing with interpretable machine learning and mechanical specific energy theory // Rock Mechanics Bulletin. 2025, vol. 4(14), p. 100173. DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.10017.

28. Zhenni Li, Jiang Wang, Dong Xiao, Zhengmin Gu, Hongfei Xie. Iron ore rock classification and mine remote sensing inversion based on spectroscopy and improved extreme learning machine // Infrared Physics & Technology. 2024, vol. 140, p. 105400. DOI: 10.1016/j.infrared.2024.105400.

29. Yewuhalashet Fissha, Prashanth Ragam, Hajime Ikeda, N. Kushal Kumar, Tsuyoshi Adachi, Paul P. S., Youhei Kawamura. Data-driven machine learning approaches for simultaneous prediction of peak particle velocity and frequency induced by rock blasting in mining // Rock Mechanics Bulletin. 2025, vol. 4, p. 100166. DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.100166.

30. Botao Lin, Yan Jin, Qianwen Cao, Han Meng, Huiwen Pang, Shiming Wei. Developing a large language model for oil- and gas-related rock mechanics: Progress and challenges // Natural Gas Industry B. 2025, vol. 12, pp. 110–122. DOI: 10.1016/j.ngib.2025.03.007.

31. Jimmy Xuekai Li, Tiancheng Zhang, Yiran Zhu, Zhongwei Chen. Artificial general intelligence for the upstream geoenery industry: A review // Gas Science and Engineering. 2024, vol. 131, p. 205469. DOI: 10.1016/j.gjsce.2024.205469.

32. Lun-Chi Chen, Mayuresh Sunil Pardeshi, Yi-Xiang Liao, Kai-Chih Pai. Application of retrieval-augmented generation for interactive industrial knowledge management via a large language model // *Computer Standards & Interfaces*. 2025, vol. 94, p. 1033995. DOI: 10.1016/j.csi.2025.1033995.

33. Miyoung Uhm, Jaehee Kim, Seungjun Ahn, Hoyoung Jeong, Hongjo Kim. Effectiveness of retrieval augmented generation-based large language models for generating construction safety information // *Automation in Construction*. 2025, vol. 170, p. 105926. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105926.

34. Leszek Lankof, Radosław Tarkowski. GIS-based analysis of rock salt deposits' suitability for underground hydrogen storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023, vol. 38, pp. 27748–27765. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.415.

35. Arman Hazrathosseini, Ali Moradi Afrapoli. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived // *Resources Policy*. 2022, vol. 80, p. 103155. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103155.

36. Luke van Eyk, P. Stephan Heyns. A framework to define, design and construct digital twins in the mining industry // *Computers & Industrial Engineering*. 2025, vol. 200, p. 110805. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110805. **ПЛАБ**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Грищенко Екатерина Николаевна*¹ — канд. техн. наук, <http://orcid.org/0000-0001-5377-7639>, e-mail: grischenkova_en@pers.spmi.ru;

*Кутепов Юрий Иванович*¹ — докт. техн. наук, профессор, <http://orcid.org/0009-0004-3333-5699>, e-mail: Kutepov_YuI@pers.spmi.ru;

*Кутепова Надежда Андреевна*¹ — докт. техн. наук, старший научный сотрудник, <http://orcid.org/0009-0006-3803-7222>, e-mail: Kutepova_NA@pers.spmi.ru;

*Васильева Анастасия Дмитриевна*¹ — канд. техн. наук, научный сотрудник, e-mail: Vasileva_AD@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-2769-3738;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, Россия (Научный центр геомеханики и проблем горного производства, e-mail: ekgr.mail@gmail.com).

Для контактов: *Грищенко Екатерина Николаевна*, e-mail: ekgr.mail@gmail.com.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Methodology for assessing the geodynamic state of natural and technogenic systems during the implementation of deposit development projects. *Mining Journal*. 2020. V. 1. pp. 49–52. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.09.

2. Kutepov Yu. Yu. Hydrogeomechanical Justification of Pit Wall Stability during Disposal of Liquid Industrial Waste. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024, no. 9, pp. 65–77. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_65.

3. Pavlovich A.A., Khoreva A. Yu. Determination of Strength Characteristics of Waste Rock Mass for Slope Stability Assessment. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 55–61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08.

4. Kalashnik N.A. Influence of Tailings Saturation on the Hydrogeomechanical State of the Containment Dam: 3D Modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025, no. 5, pp. 144–155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_144.

5. Zhuravkov M. A., Kologrivko A. A., Kuzmich V. A., Nikolaychik M. A. Creation of a Block Geomechanical Model of a Spent Sludge Storage Facility Using Micromine Origin & Beyond. *Mining Mechanics and Mechanical Engineering*. 2023, no. 1, pp. 13–22. [In Russ].
6. Chukaeva M. A., Matveeva V. A., Sverchkov I. P. Integrated Processing of High-Carbon Ash and Slag Waste. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 97–104. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.5.
7. Bakhaeva S. P., Tur K. A., Ilyushkin V. D. Geomechanical Justification of Slope Stability in Joint Deposition of Overburden and Beneficiation Waste. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020, no. 4(140), pp. 49–59. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-49-59.
8. Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospekhov G. B., Straupnik I. A. Engineering and Geological Properties of Coal Processing Waste in Storage Conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022, no. 12, pp. 77–93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77.
9. Zhabko A. V., Volkomorova N. V., Zhabko N. M. Stability Analysis of Waste Dumps on Weak Inclined Contacts. *News of the Ural State Mining University*. 2021, no. 1, pp. 87–101. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-87-101.
10. Pashkevich M. A., Danilov A. S. Environmental Safety and Sustainable Development. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 153–154. [In Russ].
11. Semyachkov A. I., Pochechun V. A., Semyachkov K. A. Hydrogeoecological Conditions of Technogenic Groundwater in Waste Disposal Facilities. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 168–179. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.
12. Pashkevich M. A., Alekseenko A. V., Nureev R. R. Formation of Environmental Damage in Storage of Sulfide-Containing Beneficiation Waste. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 155–167. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
13. Shabarov A. N., Kuranov A. D. Main Directions of the Mining Industry Development under Increasingly Complex Mining and Technical Conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 5–34. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01.
14. Kutepov Yu. Yu., Karasev M. A. Study and Forecast of Phosphogypsum Compaction in Dumps for Justification of Their Capacity. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 61–67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09.
15. Sokolovskiy A. V., Gonchar N. V. Assessment of the Use of Technogenic Resources in the Development of Various Types of Mineral Raw Materials. *Mining Industry*. 2023, no. 5, pp. 102–107. [In Russ].
16. Makarov A. B., Livinsky I. S., Spirin V. I., Pavlovich A. A. Managing the stability of quarry slopes as a basis for responding to global challenges. *News of Tula State University. Earth Sciences*. 2021. V. 3. pp. 188–202. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-182-196
17. Rylnikova M. V., Klebanov D. A., Rybin V. V., Rozanov I. Yu. Monitoring and Management of Geomechanical Condition and Stability of Mining Structures Based on Big Data Analysis. *Mining Industry*. 2024, no. 4, pp. 121–128. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-121-128.
18. Rozhdestvenskaya I. A., Zavalko N. A., Lukichev K. E., Zubenko A. V., Laffakh A. M. Application of Big Data Technologies to Increase Stability and Efficiency of the Coal Industry under Digital Transformation. *Ugol*. 2025, no. 1, pp. 82–92. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-82-92.
19. Egorov N. A., Fokin I. V., Dubinya N. V. Prediction of Stress-Strain State Behavior of Rock Samples Using Recurrent Neural Networks. *Science and Technological Developments*. 2024, vol. 103, no. 2, pp. 59–74. [In Russ]. DOI: 10.21455/std2024.2-4.
20. Krasnyukova N. L., Panina O. V., Eremin S. G., Zubenko A. V., Laffakh A. M. Intelligent Forecasting of Ground Displacement Using Parallel Neural Network Models and High-Precision Geodetic Measurements. *Mining Industry*. 2025, no. 2, pp. 106–112. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-106-112.

21. Grigoryuk A. P., Braginskaya L. P., Seminsky I. K., Seminsky K. Zh., Kovalevsky V. V. Digital Platform for Integration and Analysis of Geophysical Monitoring Data in the Baikal Natural Territory. *Electronic Libraries*. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 303–316. [In Russ]. DOI: 10.26907/1562-5419-2022-25-4-303-316.
22. Nepsha F. S., Krasilnikov M. I., Perevalov K. V. Application of a Digital Platform for Building Intelligent Power Supply Management Systems at Mining Enterprises. *Automation and IT in Energy*. 2021, no. 5, pp. 26–34. [In Russ].
23. Zenkov I. V., Kustikova E. A., Le Khung Ch., Silvanovich O. V., Yuronen Yu. P., Maglinets Yu. A., Raevich K. V., Gerasimova E. I., Mironova Zh. V., Skornyakova S. N. Digital Platform for Environmental Monitoring of Disturbed Lands at Open-Pit Mining Sites Using Remote Sensing and Artificial Intelligence. *Ecology and Industry of Russia*. 2024, vol. 28, no. 1, pp. 52–57. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-1-52-57.
24. Guman O. M., Makarov A. B., Antonova I. A., Wegner-Kozlova E. O. Digital Technologies in the Environmental Monitoring System at Solid Mineral Deposits. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 2, pp. 97–102. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-97-102.
25. Rylnikov A. G., Pytalev I. A. Digital Transformation of the Mining Industry: Technical Solutions and Technological Challenges. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2020, no. 1, pp. 470–481. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481.
26. Joseph Mwanza, Peter Mashumba, Arnesh Telukdarie. A Framework for Monitoring Stability of Tailings Dams in Realtime Using Digital Twin Simulation and Machine Learning. *Procedia Computer Science*. 2024, vol. 232, pp. 2279–2288. DOI: 10.1016/j.procs.2024.02.047.
27. Xiaoying Zhuang, Yuhang Liu, Yuwen Hu, Hongwei Guo, Binh Huy Nguyen. Prediction of rock fracture pressure in hydraulic fracturing with interpretable machine learning and mechanical specific energy theory. *Rock Mechanics Bulletin*. 2025, vol. 4(14), p. 100173. DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.10017.
28. Zhenni Li, Jiang Wang, Dong Xiao, Zhengmin Gu, Hongfei Xie. Iron ore rock classification and mine remote sensing inversion based on spectroscopy and improved extreme learning machine. *Infrared Physics & Technology*. 2024, vol. 140, p. 105400. DOI: 10.1016/j.infrared.2024.105400.
29. Yewuhalashet Fissha, Prashanth Ragam, Hajime Ikeda, N. Kushal Kumar, Tsuyoshi Adachi, Paul P. S., Youhei Kawamura. Data-driven machine learning approaches for simultaneous prediction of peak particle velocity and frequency induced by rock blasting in mining. *Rock Mechanics Bulletin*. 2025, vol. 4, p. 100166. DOI: 10.1016/j.rockmb.2024.100166.
30. Botao Lin, Yan Jin, Qianwen Cao, Han Meng, Huiwen Pang, Shiming Wei. Developing a large language model for oil- and gas-related rock mechanics: Progress and challenges. *Natural Gas Industry B*. 2025, vol. 12, pp. 110–122. DOI: 10.1016/j.ngib.2025.03.007.
31. Jimmy Xuekai Li, Tiancheng Zhang, Yiran Zhu, Zhongwei Chen. Artificial general intelligence for the upstream geenergy industry: A review. *Gas Science and Engineering*. 2024, vol. 131, p. 205469. DOI: 10.1016/j.gjsce.2024.205469.
32. Lun-Chi Chen, Mayuresh Sunil Pardeshi, Yi-Xiang Liao, Kai-Chih Pai. Application of retrieval-augmented generation for interactive industrial knowledge management via a large language model. *Computer Standards & Interfaces*. 2025, vol. 94, p. 1033995. DOI: 10.1016/j.csi.2025.103395.
33. Miyoung Uhm, Jaehee Kim, Seungjun Ahn, Hoyoung Jeong, Hongjo Kim. Effectiveness of retrieval augmented generation-based large language models for generating construction safety information. *Automation in Construction*. 2025, vol. 170, p. 105926. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105926.

34. Leszek Lankof, Radosław Tarkowski. GIS-based analysis of rock salt deposits' suitability for underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023, vol. 38, pp. 27748–27765. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.415.

35. Arman Hazrathosseini, Ali Moradi Afrapoli. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived. *Resources Policy*. 2022, vol. 80, p. 103155. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103155.

36. Luke van Eyk, P. Stephan Heyns. A framework to define, design and construct digital twins in the mining industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2025, vol. 200, p. 110805. 10.1016/j.cie.2024.110805.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Grishchenkova E. N.*¹, Cand. Sci. (Eng.), <http://orcid.org/0000-0001-5377-7639>, e-mail: grishchenkova_en@pers.spmi.ru;

*Kutepov Yu I.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, <http://orcid.org/0009-0004-3333-5699>, Russia, e-mail: Kutepov_YuI@pers.spmi.ru;

*Kutepova N. A.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <http://orcid.org/0009-0006-3803-7222>, e-mail: Kutepova_NA@pers.spmi.ru;

*A. D. Vasilieva*¹, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, e-mail: Vasileva_AD@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-2769-3738

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 Line, 2, Russia.

For contacts: *Grishenkova E. N.*, e-mail: ekgr.mail@gmail.com.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Получена редакцией 14.08.2025; получена после рецензии 02.10.2025; принята к печати 10.10.2025.

Received by the editors 14.08.2025; received after the review 02.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.

