ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(11-1):5-21
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 662.1/.4 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_5

ЦИФРОВОЙ КОНТИНУУМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ РЕЦИКЛИНГА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Е. Франтов[1], А.В. Шляпин[1], И.Н. Лапиков[1], Ф.С. Белоусов[1]

[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН), Москва, Россия, e-mail: ya@afrantov.ru

Аннотация: Предложен подход к формированию цифрового контура буровзрывных работ с применением гранулитов на основе материалов рециклинга в Арктической зоне РФ. Алгоритм интегрирует горно-геологические данные, параметры бурения и проектирования буровзрывных работ, сведения о составе и свойствах материалов рециклинга, расчетные модели взрывчатых веществ, географическую и экологическую информацию. На основе цифровых моделей оцениваются свойства гранулитов с материалами рециклинга: теплота взрыва, скорость детонации и давление. При проектировании буровзрывных работ определяются рациональные параметры заряжания и взрывания с учетом геолого-технических условий. Рассчитываются параметры пылегазового облака массового взрыва: объем и содержание газообразных и пылевых компонентов. Для Арктической зоны РФ дополнительно учитываются метеорологические условия, рельеф, природно-географические характеристики, водные объекты и иные факторы, влияющие на распространение пылегазового облака. Результаты используются для оценки экологического воздействия буровзрывных работ и выбора технологических решений, адаптирующих состав материалов рециклинга и параметры гранулитов к северным и арктическим условиям. Основу цифрового контура составляет структура из шести взаимосвязанных блоков: «Горно-геологическая информационная система» – «Буровзрывные работы» – «Рециклинговые материалы» – «Хемоинформатика» – «Географические IT-решения» – «Экологические IT-решения». Буровзрывные работы – центральный процесс, материалы рециклинга – ключевой фактор свойств гранулитов, условия Арктической зоны РФ – обязательные ограничения. Каждый блок включает модули и инструменты для обмена данными на всех этапах работ. Рекомендуется использовать программное обеспечение с открытым кодом или средства, поддерживающие интеграцию разнородных данных.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, буровзрывные работы, горно-геологическая информационная система, гранулиты, материалы рециклинга, пылегазовое облако, цифровой контур, цифровое моделирование, экологическая оценка.

Для цитирования: *Франтов А. Е., Шляпин А. В., Лапиков И. Н., Белоусов Ф. С.* Цифровой континуум проектирования и экологического сопровождения буровзрывных работ с использованием материалов рециклинга в Арктической зоне Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11-1. – С. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_5.

© А.Е. Франтов, А.В. Шляпин, И.Н. Лапиков, Ф.С. Белоусов. 2026.

The digital continuum of design and environmental support for drilling and blasting operations using recycled materials in the Arctic zone of the Russian Federation

A.E. Frantov[1], A.V. Shlyapin[1], I.N. Lapikov[1], F.S. Belousov[1]

[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: ya@afrantov.ru

Abstract: An approach to forming a digital framework for drilling and blasting operations using granules based on recycling materials in the Arctic zone of the Russian Federation is proposed. The algorithm integrates geological and mining data, drilling and blasting design parameters, information about the composition and properties of recycling materials, computational models of explosives, and geographical and environmental information. Based on digital models, the properties of granules containing recycling materials are assessed: the heat of explosion, detonation velocity, and pressure. When designing drilling and blasting operations, rational parameters for loading and blasting are determined, taking into account the geological and technical conditions. The parameters of the dust-gas cloud from a mass explosion are calculated: the volume and content of gaseous and dust components. For the Arctic zone of the Russian Federation, meteorological conditions, terrain, natural and geographical characteristics, water bodies, and other factors influencing the spread of the dust-gas cloud are additionally taken into account. The results are used to assess the environmental impact of drilling and blasting operations and to select technological solutions that adapt the composition of recycling materials and the parameters of granulites to northern and Arctic conditions. The digital loop is based on a structure consisting of six interconnected blocks: «Mining and Geological Information Systems»; «Drilling and Blasting Operations»; «Recycled Materials»; «Chemoinformatics»; «Geospatial IT Solutions»; «Environmental IT Solutions». Drilling and blasting operations are the central process; recycling materials are a key factor in the properties of granulates; the conditions of the Arctic zone of the Russian Federation impose mandatory restrictions. Each block includes modules and tools for data exchange at all stages of the work. It is recommended to use open-source software or tools that support the integration of heterogeneous data.

Key words: Arctic zone of the Russian Federation, drilling and blasting operations, Mining and geological information system, granulites, recyclable materials, dust and gas cloud, digital circuit, digital modeling, environmental assessment.

For citation: Frantov A. E., Shlyapin A. V., Lapikov I. N., Belousov F. S. The digital continuum of design and environmental support for drilling and blasting operations using recycled materials in the Arctic zone of the Russian Federation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11-1): 5-21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_5.

Введение

Цифровое сопровождение буровзрывных работ (БВР) с использованием материалов рециклинга (МР) в Арктической зоне РФ (АЗРФ) целесообразно рассматривать как интегрированную систему моделей и данных, связывающую физические параметры взрывчатого материала, горно-геологические условия блока, параметры бурения и заряжания, технологию взрывания, характеристики окружающей территории и экологические последствия взрыва. Центральным элементом такого подхода является цифро-

вая модель БВР, в которой свойства гранулитов с МР задаются не как фиксированные значения, а как параметры, зависящие от компонентного состава, технологических условий подготовки МР и условий применения. На основе данных горно-геологических информационных систем (ГГИС) и интерактивных паспортов бурения происходит формирование исходных сведений для проектирования БВР, с использованием которых производят определение параметров отбойки для конкретного блока или массива горных пород. Важным преимуществом простейших ВВ является возможность варьирования компонентного состава с учетом доступного сырья. Это относится к использованию окислителя[1,2], горючего[3,4,5], энергетических добавок[6,7], рециклинговых материалов[8,9,10].

Требуемые технологические показатели[11,12,13], поддерживаются, в том числе при эксплуатации в условиях низких температур и других осложняющих факторов Арктической зоны РФ.

Цифровое моделирование позволяет связать выбор МР и характеристики гранулитов с параметрами БВР, а также с требованиями к смесительно-зарядному оборудованию[14]. Для практического применения необходимо учитывать, что различные виды МР требуют различаю-

---

[1] Викторов С.Д., Франтов А.Е. Простейшие гранулированные ВВ местного изготовления: характеристики и направления совершенствования // Взрывное дело. – 2014. – № 112–69. – С. 178–201.

[2] Frantov A. E., Lapikov I. N. Evaluation of technological parameters of cheap explosives' components in terms of using in northern and arctic regions of Russia // AIP Conference Proceedings. 2022, vol. 2656, article 020009. DOI: 10.1063/5.0106797.

[3] Frantov A. E., Viktorov S. D., Lapikov I. N. Comparison of Oil Products as Components of Granulits for Siberia, Extreme North and the Arctic Areas // Eurasian Mining. 2023, no. 2, pp. 70–75.

[4] Frantov A. E., Lapikov I. N. Resource potential of recycling materials for blasting in North and Arctic regions with diesel power operations // E3S Web of Conferences. 2024, vol. 592, article 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/202459203007.

[5] Солодухин Е. С., Шушпанов А. Н., Акинин Н. И., Франтов А. Е., Лапиков И. Н. Преимущества применения биодизельного топлива в качестве горючего компонента простейших взрывчатых материалов // Взрывное дело. – 2024. – № 145–102. – С. 116–135.

[6] Франтов А. Е., Викторов С. Д., Лапиков И. Н., Вяткин Н. Л., Болотова Ю. Н. Развитие методических подходов при моделировании свойств многокомпонентных гранулитов, применяемых в условиях низких температур и других осложняющих факторов // Горная промышленность. – 2024. – № S5. – С. 79–90.

[7] Викторов С. Д., Франтов А. Е., Лапиков И. Н. Результаты сравнительных испытаний гранулитов разного рецептурного состава // Горный журнал. – 2022. – № 7. – С. 67–71.

[8] Франтов А. Е., Белоусов Ф. С. Исследование некоторых свойств твердых горючих компонентов для простейших взрывчатых веществ // Инженерная физика. – 2019. – № 11. – С. 51–57.

[9] Франтов А. Е., Мингазов Р. Я., Фадеев В. Ю. Исследование углеводородных материалов, используемых при изготовлении гранулитов // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. 5-я конференция международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. – М., 2022. – С. 161–163.

[10] Викторов С. Д., Франтов А. Е., Лапиков И. Н. Развитие потенциала простейших взрывчатых веществ в России // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 8. – С. 7–14.

[11] Викторов С. Д., Франтов А. Е., Лапиков И. Н., Мингазов Р. Я. К методам определения технологических показателей компонентов простейших ВВ // Инженерная физика. – 2020. – № 8. – С. 5–35.

[12] Франтов А. Е., Лапиков И. Н., Мингазов Р. Я. Оценка сыпучести простейших взрывчатых веществ, содержащих в качестве горючего вторичные жидкие и твердые материалы // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М., 2019. – С. 270–275.

[13] Викторов С. Д., Франтов А. Е., Опанасенко П. И., Строгий И. Б., Жариков И. Ф., Лапиков И. Н. Инновационные направления совершенствования простейших ВВ с добавками, возвращаемыми в производственный оборот рециклингом материалов // Уголь. – 2020. – № 11 (1136). – С. 17–21.

[14] Франтов А. Е., Лапиков И. Н. Оборудование для изготовления гранулитов вблизи мест их применения с использованием материалов рециклинга в условиях Севера и Арктической зоны РФ // Горный журнал. – 2025. – № 12. – С. 61–68.

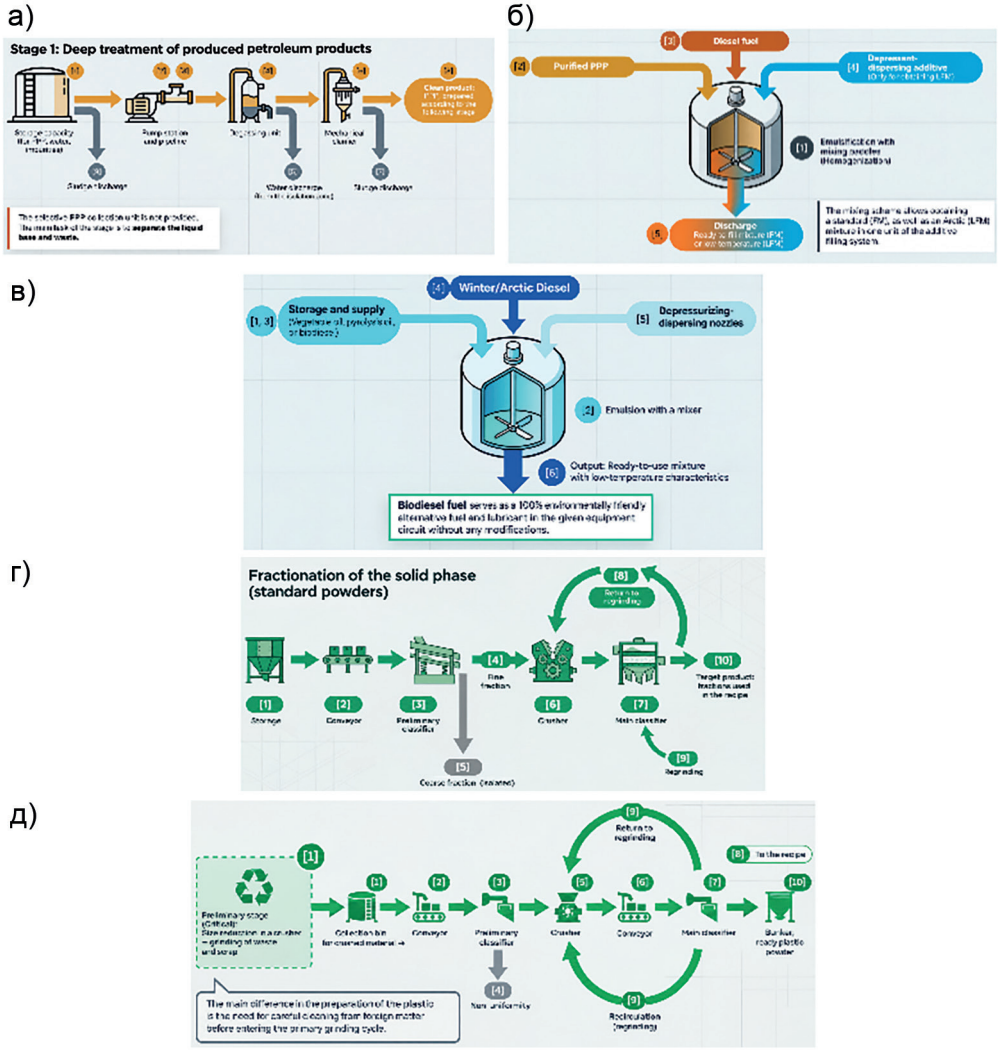


Рис. 1. Технологические схемы подготовки материалов рециклинга для применения при изготовлении гранулитов

Fig. 1. Technological schemes for preparing recycling materials for use in the production of granules

щихся способов подготовки[15]. На рис. 1 представлены отдельные технологические схемы подготовки МР: а — отработанных нефтепродуктов; б — топливной смеси; в — жидких топливных компонентов; г — порошковых добавок (вторичный алюминий, угольный порошок, коксовая мелочь, резиновая крошка); д — пластиковой крошки (полипропиленовой, полиэтиленовой).

Рассчитанные параметры блока и проектные параметры БВР передаются в следующие модули цифрового контура. На их основе определяются параметры

[15] Франтов А. Е., Лапиков И. Н., Белоусов Ф. С., Вяткин Н. Л., Болотова Ю. Н. Подготовка материалов рециклинга для гранулитов в условиях Севера и Арктики // Горная промышленность. – 2025. – № 6. – С. 126–133.

пылегазового облака (ПГО), образующегося при массовом взрыве, включая объем облака и количество основных газообразных и пылевых компонентов. Для условий АЗРФ к расчету подключаются пространственные и метеорологические данные: температура и давление воздуха, скорость и направление ветра, состояние погоды, рельеф, природная зона, местоположение водных объектов и другие характеристики территории.

Географический модуль использует эти данные для моделирования распространения ПГО, а экологический модуль — для оценки пространственного распределения загрязняющих веществ и потенциального воздействия эмиссии на атмосферный воздух, водные объекты и почвенный покров. Таким образом, экологическая оценка непосредственно связана с конкретным проектом БВР, составом гранулита с МР и условиями его применения в АЗРФ.

Материалы и методы

Для обоснования предлагаемого цифрового контура использованы методы анализа цифрового описания БВР с применением МР и оценки их экологических последствий.

Основными направлениями анализа являлись:

- цифровая трансформация процессов горного производства, рассматриваемая применительно к подготовке и выполнению БВР;
- цифровая трансформация проектирования и моделирования взрывной отбойки горных пород;
- цифровые двойники и цифровые модели технологии применения МР при БВР;
- модельные подходы к описанию состава, свойств и технологической подготовки МР;
- применение цифровых двойников в добывающей промышленности для моделирования взаимосвязанных производственных процессов;
- цифровое моделирование производственных и транспортно–логистических процессов, обеспечивающих доставку МР и работу специализированного оборудования БВР;
- цифровые модели химических и физико–химических процессов, необходимых для оценки свойств гранулитов с МР;
- цифровые решения экологического мониторинга и прогнозирования распространения загрязняющих веществ в условиях АЗРФ.

Отбор анализируемых материалов по цифровым продуктам проведен по публикациям в научной-технической печати, тематическим материалам конференций, данным медиа и других доступных источников. При систематизации материалов прежде всего учитывалась функциональная пригодность программных продуктов для формирования цифрового сопровождения БВР с применением МР в АЗРФ. Такой подход позволил сопоставлять результаты цифровой трансформации разных отраслей промышленности и, в конечном итоге, разработать алгоритм цифрового сопровождения эмиссии при ведении БВР с использованием гранулитов с МР.

Результаты и обсуждение

Горно–геологические информационные системы

Для рассматриваемой задачи ГГИС являются исходным информационным уровнем цифрового сопровождения БВР. Их функция заключается не только в хранении геологических и маркшейдерских данных, но и в подготовке пространственной модели горного массива, связанной с параметрами бурения и проектом взрывания. В контексте применения гранулитов с МР в АЗРФ ГГИС должна обеспечивать передачу в модуль

БВР данных о свойствах массива, геометрии блока, расположении скважин и других параметрах, необходимых для выбора и расчета технологических решений, а также связывать проект БВР с пространственными и природно–климатическими условиями территории.

Технологии и программное обеспечение для работы с геопространственными данными представлены как зарубежными, так и российскими разработчиками. В горнодобывающей промышленности ГГИС применяются для решения геологических, маркшейдерских и производственных задач и могут интегрироваться со специализированным ПО. Для данной работы принципиально важен не перечень конкретных продуктов, а наличие функций, позволяющих связать 3D-модель месторождения и блока с проектированием БВР, данными бурения, параметрами взрывных скважин и пространственными характеристиками территории АЗРФ. К таким решениям относятся GEOVIA Surpac, MICROMINE, DATAMINE [1] или, например, JKTech, в технической брошюре (JKTech. Software: JKSimBlast and JKVBOC, 2026) которого представлены характеристики специализированного ПО для БВР, совмещаемые JKTech с параметрами технологических процессов горных работ и обогащения.

На российском рынке представлены как зарубежные, так и отечественные программные продукты для работы с геоданными [2—4]. Для решаемой задачи существенное значение имеют информационные системы, поддерживающие проектирование БВР и интеграцию с другими источниками производственных данных. В частности, GEOMIX [5], MINEFRAME и Норсофт (МАГМА) [1] располагают функциями, связанными с проектированием БВР, а комплексные решения позволяют увязывать БВР с последующими производственными процессами [6]. Однако для формирования цифрового контура БВР с применением МР в АЗРФ требуется дополнительная интеграция данных о составе и подготовке МР, характеристиках гранулитов, метеорологических условиях и экологических ограничениях территории.

Технический ресурс программных продуктов для БВР

Для цифрового сопровождения БВР с применением МР необходимо, чтобы программные комплексы проектирования взрывных работ обеспечивали работу не только с геометрией скважин и параметрами взрывания, но и с изменяемыми свойствами ВВ. Рассмотренные специализированные решения (Blast Maker, Maxam, Orica) и многофункциональные ГГИС (MICROMINE, DATAMINE, GEOVIA, GEOMIX) позволяют решать задачи проектирования БВР с учетом горно–геологических условий [1, 7, 8]. Цифровые модели разрушения горных пород используют 3D-модели месторождения и геологические данные [9, 10], а отдельные решения учитывают временную составляющую и позволяют моделировать взрыв в 4D. Для рассматриваемого направления необходимо расширить такие модели входными параметрами, характеризующими гранулиты с МР, условия подготовки и заряжания, а также условия низких температур, характерные для АЗРФ. Интеграция специализированного ПО для проектирования БВР с ГГИС [11] создает основу для такого расширения (таблица).

Таким образом, существующие автоматизированные системы проектирования БВР обладают необходимой базой для пространственного и технологического моделирования взрывных работ, однако для оценки эмиссии химических веществ при применении гранулитов с МР в АЗРФ их функциональность должна быть расширена. В модуле «Буро-

Свойства программных модулей, инструментов и приложений информационных систем для проектирования БВР
Properties of software modules, tools, and applications of information systems for designing DBO

ГГИС, ПП, ПО	Свойства программных модулей, инструментов, приложений для проектирования БВР
CAE Mining (Datamine)	Интерактивное проектирование скважинной отбойки применительно к подземным горным работам
Geovia	Инструментальные средства проектирования БВР для карьеров
Geomix	Проектирование БВР
K–Mine	Модуль проектирования БВР применительно к открытым горным работам с расширенным функционалом (паспорта взрывов, учет геологической структуры пород, схемы взрывания, выбор типа ВВ, схем коммутации и замедлений)
Micromine	Проектирование взрывных работ
Mineframe*	Автоматизированное размещение скважин и формирование схем коммутации, корректировка моделей скважин по факту, подготовка технологической документации
Vulcan	Инструменты для автоматизированного проектирования БВР
Mincom	Интерактивный инструмент для размещения взрывных скважин с экспортом проекта на бурение в устройства управления буровых станков посредством GPS-устройств
Blastmaker	Пакет программных средств системы автоматизированного проектирования БВР на карьерах с учетом удельной энергоемкости бурения скважин
JKSimBlast (Soft–Blast / JKTech)	Комплекс проектирования, моделирования, анализа и управления взрывами на карьерах, при подземной отбойке, проходческие работы

* Открытые горные работы.

взрывные работы» целесообразно учитывать свойства конкретного состава гранулита и происхождение МР, параметры бурения, заряжания и взрывания, а также температурные и иные условия применения. Взаимодействие с модулями «География» и «Экология» должно обеспечивать моделирование распространения загрязняющих веществ с учетом рельефа, климата, природной зоны, почв и водных объектов.

В результате цифровая модель БВР должна формировать не только проект технологического результата отбойки, но и исходные данные для последующей оценки экологического воздействия.

Информационное пространство горного предприятия и цифровой двойник технологии БВР с применением МР

Для рассматриваемой задачи цифровой двойник целесообразно формировать не как абстрактную модель предприятия, а как технологически ориентированную систему, связывающую данные о горном массиве, БВР, МР, оборудовании для изготовления гранулитов, логистике и состоянии окружающей среды.

Такой подход определяет объекты моделирования, необходимый уровень детализации и состав данных на различных этапах жизненного цикла технологии.

Базис цифровой трансформации горного предприятия при применении МР в БВР в условиях Севера и АЗРФ формируется с учетом теоретических и методических подходов [12]. Примеры решения типовых задач, выбора объектов моделирования, определения уровня детализации цифровых двойников в нефтегазовой [13, 14], транспортной [15], строительной [16], горной [17] и других отраслях[16] позволяют выделить общие принципы интеграции данных для успешной адаптации к технологии БВР. Для технологии взрывания с использованием МР это означает объединение данных о составе и подготовке МР, свойствах гранулитов, геолого-геометрической модели блока, параметрах бурения и заряжания, эксплуатации специализированного оборудования, метеорологической обстановке, состоянии атмосферы и результатах экологического моделирования. Цифровая модель призвана не только отражать текущее состояние объекта, но и обеспечивать расчетные прогнозы, например, оценку характеристик взрыва, параметров ПГО и пространственного распределения загрязняющих веществ.

Технологические процессы дробления, грохочения, измельчения и классификации горных материалов, для которых разработаны алгоритмы и цифровые двойники [18], имеют методологическую аналогию с подготовкой отдельных видов МР для производства многокомпонентных гранулитов. В цифровом контуре БВР это позволяет моделировать цепочку «подготовка МР — приготовление гранулита — контроль свойств — доставка — заряжание — взрывание». При разработке цифровых двойников оборудования [19] следует учитывать особенности техники для подготовки МР и изготовления многокомпонентных гранулитов, а также условия ее эксплуатации в АЗРФ. Подходы к цифровизации бурения и территориально распределенных технологических объектов [20, 21] позволяют использовать рассматриваемые аспекты для интеграции данных о бурении, подготовке зарядов и выполнении БВР.

Транспортно-логистическая составляющая имеет особое значение для БВР в АЗРФ, поскольку позволяет использовать поступающие от различных поставщиков МР, а их подготовка и применение непосредственно связаны с мобильным специализированным оборудованием. В цифровом контуре целесообразно моделировать цепочку снабжения МР, их приемку, подготовку, хранение и доставку к месту производства и применения гранулитов, а также работу зарядных и смесительно-зарядных машин. Использование BIM и имитационного моделирования транспортных систем [22] позволяет учитывать производительность, пропускную способность и временные ограничения логистики. PLM-платформы [23] создают возможность для интеграции сведений о МР, поступающих от разных поставщиков, а цифровые двойники цепей поставок [24—26] — для учета оперативных изменений и нештатных ситуаций. Для АЗРФ особое значение имеют доступность транспортной инфраструктуры, сезонность, погодные условия и территориальная удаленность объектов БВР.

Разработка цифрового контура БВР с применением МР включает учет общих подходов, апробированных в других отраслях промышленности [27, 28]: идентификация критических процессов, формирование критериев оценки, математическое и имитационное моделиро-

[16] Электронная структура документа ГОСТ 2.053–2013 [Электронный ресурс]. – URL: https://cals.ru/sites/default/files/downloads/2.053–2013.pdf (дата обращения: 09.02.2026).

вание, верификация моделей и последующая оптимизация технологических решений. Применительно к БВР это позволяет последовательно оценивать связку «горно-геологические условия — бурение — состав и подготовка МР — параметры гранулита — схема взрывания — результат отбойки — эмиссия химических веществ». Такой подход повышает воспроизводимость проектных решений и создает основу для оперативной корректировки БВР при изменении природных или производственных условий АЗРФ.

Природно-географическая неоднородность и суровые климатические условия АЗРФ являются не внешним фоном, а параметрами цифровой модели БВР. При моделировании принимают в расчет рельеф, температуру, давление, ветровой режим, сезонные особенности и размещение чувствительных объектов, включая водные ресурсы. Данные ГИС, в том числе средства моделирования рельефа и местности [29], дают возможность пространственной привязки проекта БВР и расчета распространения ПГО. В результате географический модуль становится воплощением связующего звена между технологической моделью взрывания и экологической оценкой его последствий на конкретной территории.

Специализированный транспорт и оборудование являются непосредственными элементами технологической цепочки БВР с использованием гранулитов с МР в АЗРФ. Поэтому цифровой двойник представляет собой модели транспортных, зарядных и смесительно-зарядных машин, а также оборудования для подготовки МР и изготовления гранулитов [30]. Имитационное моделирование позволяет оценивать последовательность операций, загрузку оборудования, продолжительность технологических циклов и возможные ограничения, обусловленные климатом и логистикой.

3D-модели и средства визуализации [31, 32] предполагают использование для анализа размещения оборудования и операций по подготовке и применению гранулитов с МР. Тем самым цифровое описание оборудования дополняет модель БВР, а не существует независимо от нее.

Моделирование свойств гранулитов и химических процессов

Цифровое моделирование свойств гранулитов с МР включает корректное описание исходных данных о составе, свойствах компонентов и протекающих физико-химических процессах. Работы по цифровым двойникам химических процессов показывают применимость математических моделей [33], систем сбора и обработки данных [34, 35], а также машинного обучения и предиктивной аналитики [36, 37] для оптимизации технологических процессов.

Такие подходы позволяют рассматривать установление связи между составом и подготовкой МР, характеристиками гранулита в единой цифровой системе с параметрами его применения в БВР. Особое значение для АЗРФ имеет учет низких температур и других условий, влияющих на свойства компонентов и устойчивость технологического процесса. Цифровая модель в таком случае включает в качестве входных параметров не только номинальный состав, но и фактические характеристики МР и условия их применения.

Эмиссия и экологическое сопровождение БВР

Цифровые модели оценки загрязнения атмосферного воздуха являются непременным атрибутом рассматриваемого контура для прогноза последствий конкретного массового взрыва. Стратегические направления цифровой трансформации отрасли экологии и природо-



Рис. 2. Алгоритм цифрового сопровождения эмиссии при ведении БВР с использованием гранулитов с материалами рециклинга

Fig. 2. Algorithm for digital monitoring of emissions during drilling and blasting operations using granulates with recycling materials

пользования[17], а также существующие информационные системы и программные комплексы для моделирования распространения загрязняющих веществ [38, 39] создают методическую основу такого решения. При этом следует учитывать не только хорошо изученное воздействие выбросов загрязнителей в атмосферу, но также влияние эмиссии вредных веществ при ведении БВР, оказываемое на водные ресурсы, почвенный слой, растительность. Методы прогнозирования пространственного распределения загрязнителей с использованием адаптивных моделей и ИИ [40, 41] могут быть ориентированы на специфику ПГО, формируемого при БВР. Для технологической модели важно, чтобы характеристики источника загрязнения определялись из проекта конкретного взрыва: состава гранулита и МР, массы заряда, параметров скважин и режима взрывания. Далее с учетом метеорологических условий и рельефа рассчитывается пространственное распределение загрязняющих веществ. Методические подходы к оценке воздействия выбросов на природную среду [42, 43] позволяют связывать полученные концентрации химических веществ с их воздействием на атмосферный воздух, воду и почву. Перспективным направлением является также включение в цифровую систему сценариев снижения пылегазовой нагрузки при ведении БВР, включая решения по пылегазоподавлению [44]. Использование ИИ целесообразно прежде всего как инструмент анализа данных и прогноза пространственного распределения загрязнителей, включая задачи, связанные с применением гранулитов с МР [45, 46].

Алгоритм цифрового сопровождения эмиссии при ведении БВР с использованием гранулитов с материалами рециклинга представлен на рис. 2. Практическая ценность предлагаемого подхода заключается в возможности сопоставлять технологическую эффективность БВР и экологические последствия применения конкретного состава гранулита с МР в конкретных условиях арктической территории. Цифровой контур для БВР с использованием материалов рециклинга в АЗРФ понимается как ин-

[17] Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2021 г. № 3496–р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403109030/ (дата обращения: 04.02.2026).

тегрированная система, в которой БВР является центральным технологическим звеном, характеристики МР и гранулитов — управляемыми входными параметрами, а природно–климатические условия АЗРФ — обязательными ограничениями и исходными данными. Такая архитектура обеспечивает последовательную передачу данных от ГГИС и проектирования БВР через модели состава и свойств гранулитов, подготовку и логистику МР к расчету ПГО, его пространственному распространению и оценке экологического воздействия.

Заключение

1. Проблема цифрового сопровождения буровзрывных работ с применением материалов рециклинга в Арктической зоне Российской Федерации заключается не в отсутствии отдельных программных средств, а в создании единого формализованного представления о взаимосвязи технологических, физико-химических, географических и экологических процессов. Современные ГГИС и специализированные системы проектирования БВР уже позволяют описывать геометрию блока, параметры бурения, заряжания и инициирования, однако эти средства решают локальные задачи проектирования. Следовательно, дальнейшее развитие цифровых технологий БВР должно основываться на переходе от набора специализированных приложений к интегрированной модели процесса, в которой результат взрыва и его экологические последствия рассматриваются как взаимосвязанные проявления единой технологической системы.

2. В качестве фундаментального положения обосновано представление БВР с использованием МР как многоуровневого связанного процесса, в котором состав, происхождение и состояние МР определяют свойства гранулита; свойства гранулита, в свою очередь, определяют энергетические и детонационные характеристики заряда и рациональные параметры его применения; параметры конкретного взрыва формируют технологический результат отбойки и характеристики эмиссии; пространственное распространение продуктов взрыва определяется рельефом, метеорологическими и природно-географическими условиями. Тем самым предложенная постановка позволяет перейти от описания отдельных технологических операций к исследованию причинно-следственной цепи «состав МР — свойства гранулита — параметры БВР — результат взрыва — эмиссия — пространственное воздействие».

3. Концептуальная структура цифрового контура, объединяющая шесть взаимосвязанных блоков, включает: ГГИС, БВР, рециклинговые материалы, хемоинформатику, географические и экологические IT-решения. С научной точки зрения принципиально важно, что эта структура трактует БВР как центральный процесс, а сведения о составе МР, свойствах гранулитов и условиях АЗРФ — как переменные и ограничения цифровой модели. В отличие от статического электронного паспорта взрыва, такой подход предусматривает использование цифровой модели для расчетного прогнозирования и сравнения альтернативных технологических решений.

4. Для условий Севера и АЗРФ обосновано расширение цифровой модели за счет фактических характеристик МР и гранулитов, параметров их подготовки и заряжания, а также температурных и иных осложняющих факторов. Это принципиально для проведения фундаментальных исследований зависимости энергетических, детонационных и технологических характеристик многокомпонентных гранулитов от состава и условий применения. В результате цифровой двойник БВР приобретает значение

не только инструмента проектирования, но и исследовательской среды для выявления закономерностей изменения свойств зарядов и технологического результата при вариации исходных параметров.

5. Экологическое сопровождение не должно рассматриваться как последующая по отношению к проектированию БВР процедура. В предлагаемом контуре характеристики источника загрязнения определяются непосредственно параметрами конкретного взрыва — составом гранулита и МР, массой заряда, геометрией скважин и режимом инициирования, после чего, с учетом метеорологии и рельефа, рассчитывается пространственное распространение пылегазового облака и потенциальное воздействие на атмосферный воздух, водные объекты и почвенный покров. Такая постановка формирует основу для научного перехода от расчета технологического эффекта взрыва к совместной оптимизации технологических и экологических критериев.

6. Полученные результаты определяют перспективное направление дальнейших фундаментальных исследований: построение и экспериментальная верификация математических зависимостей, связывающих состав и состояние МР, физико-химические свойства гранулитов, параметры БВР, характеристики разрушения горного массива и образование загрязняющих веществ; оценка чувствительности и неопределенности этих зависимостей; калибровка моделей по данным натурных измерений; разработка критериев оптимальности для выбора состава гранулита и параметров взрывания. Таким образом, научный результат работы состоит в формировании методологической основы цифрового двойника БВР с МР, способного объединить моделирование состава и свойств взрывчатого материала, технологию взрывания, геопространственные условия и экологические последствия в едином прогнозном контуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наговицын О. В.*, *Лукичев С. В.* Горно-геологические информационные системы — история развития и современное состояние. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2016. — 196 с.

2. *Карпик А. П.* Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. — Новосибирск: СГГА, 2004. — 259 с.

3. *Цветков В. Я.* Геоинформационные системы и технологии. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 288 с.

4. *Капутин Ю. Е.* Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров). — СПб.: Недра, 2004. — 424 с.

5. *Морозова Т. П.* Перспективы применения в горной промышленности российских систем цифрового проектирования: ГИС «Геомикс» и Mineframe // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 5. — С. 132—135.

6. *Дремин А. В.*, *Великанов В. С.* Цифровые технологии для взрывных работ: интеллектуальный автономный программно-аппаратный комплекс компании «Давтех» для анализа гранулометрического состава горных пород // Горная промышленность. — 2023. — № 6. — С. 57—62. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-57-62.

7. *Волков Ю. И.*, *Серый С. С.*, *Герасимов А. В.* Перспективы внедрения ГИС ГЕОМИКС на горных предприятиях // Маркшейдерский вестник. — 2012. — № 2. — С. 32—34.

8. *Рада А. О.*, *Петерс К. И.*, *Кузнецов А. Д.* Проектирование буровзрывных работ на основе 3D-модели выемочного блока // Уголь. — 2024. — № 6. — С. 87—91. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-87-91.

9. *Петерс К. И.*, *Щербакова Л. Н.*, *Федулова Е. А.*, *Кузнецова А. Д.*, *Бурмин Л. Н.* Практика применения 3D-модели в горной промышленности на примере угольных предприятий в Кемеровской области — Кузбассе // Уголь. — 2024. — № 10. — С. 110—117. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-110-117.

10. *Фадеев А. А.*, *Заборский Е. Н.*, *Багдасарян О. Е.* Цифровые решения буровзрывной деятельности как способ повышения эффективности, безопасности ведения работ при дроблении горной массы // Уголь. — 2024. — № 12. — С. 99—102. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-99-102.

11. *Наговицин О. В.* Концепция и методы формирования горно-геологической информационной системы (ГГИС MINEFRAME): автореф. дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. — 48 с.

12. *Афанасьев А. А.* Цифровая трансформация промышленного производства: теоретические аспекты и политика ее реализации: научный доклад. — М.: Институт экономики РАН, 2024. — 73 с.

13. *Еремин Н. А.*, *Черников А. Д.*, *Столяров В. Е.* Значение информации для цифровой трансформации при бурении и строительстве нефтегазовых скважин // Бурение и нефть. — 2022. — № 7—8. — С. 8—18.

14. *Четвертнева И. А.*, *Тептерева Г. А.*, *Шавшукова С. Ю.* Становление и развитие способов бурения скважин в России и за рубежом // История и педагогика естествознания. — 2019. — № 3. — С. 33—39. DOI: 10.24411/2226-2296-2019-10307.

15. *Сосфенов Д. А.* Использование цифровых двойников в автомобильной промышленности: российский и зарубежный опыт // Экономика и управление. — 2023. — Т. 29. — № 6. — С. 662—669. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-6-662-669.

16. *Коротеев Д. Д.*, *Ким А. А.*, *Васютин А. О.* Перспективы применения цифровых двойников в строительной отрасли // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. URL: https://esj.today/PDF/12SAVN224.pdf (дата обращения: 18.08.2026).

17. *Артемов И. В.*, *Носырев М. Б.* Технология цифровых двойников и ее применение в горнодобывающей промышленности // Маркшейдерия и недропользование. — 2024. — № 5. — С. 38—43. DOI: 10.56195/20793332_2024_5_38_43.

18. *Золотарев О. В.* pSeven Enterprise как средство управления цифровыми двойниками в горнодобывающей промышленности [Электронный ресурс] / Материалы конференции DATADVANCE-2022, г. Москва, 7 сентября 2022 г. URL: https://datadvance.ru (дата обращения: 18.08.2026).

19. *Джомартов М., Байрамова Дж.* Разработка и применение интерактивных цифровых двойников (Digital Twins) оборудования и инфраструктуры в горном деле // Инновационная наука. — 2025. — № 6-1. — С. 15—22.

20. *Быкова В. Н.*, *Ким Е.*, *Гаджиалиев М. Р.*, *Мусиенко В. О.*, *Оруджев А. О.*, *Туровская Е. А.* Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2020. — № 1(28). — С. 8. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712-2020-28-art8.

21. *Сучок С. Н.*, *Коренев Р. В.*, *Кушманов П. В.* Цифровой двойник бурения как операционная среда повышения эффективности процесса строительства скважин // Бурение и нефть. — 2021. — № 11. — С. 32—37.

22. *Петренко Д. А.*, *Субботин С. А.* BIM-решения «ИндорСофт» для проектирования и эксплуатации автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. — 2015. — № 2(5). — С. 100—107. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.15.

23. *Клебанов А. Ф.*, *Еремкин И. В.*, *Габусу П. А.* Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами // Горная промышленность. — 2025. — № 4. — С. 61—70. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-61-70.

24. *Podolskaya T. V.*, *Sotnikov A. G.* Introduction of advanced digital technology in transport and logistics in modern conditions // Вопросы инновационной экономики. — 2024. — Т. 14. — № 4. — С. 1479—1496. DOI: 10.18334/vinec.14.4.121649.

25. *Коновалова Т. В.*, *Надирян С. Л.*, *Котенкова И. Н.*, *Коцурба С. В.* Внедрение технологии блокчейн в деятельность транспортно-логистических предприятий // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. — 2023. — № 6. — С. 240—243. DOI: 10.23672/SAE.2023.23.13.022.

26. *Беньямин О. Д.* Анализ преимуществ и проблем внедрения нейросетей в складской логистике на примере склада готовой продукции на пищевом предприятии // Экономика, предпринимательство и право. — 2024. — № 5. — С. 2521—2532. DOI: 10.18334/epp.14.5.120912.

27. *Разумовский В. А.* Критические промышленные технологии: механизм отбора // Экономика и предпринимательство. — 2020. — № 3(116). — С. 118—124.

28. *Современное* состояние и перспективы научно-технологического развития промышленных предприятий: монография / под науч. ред. М. Я. Веселовского, Н. С. Хорошавиной. — М.:

Мир науки, 2025. Сетевое издание. URL: https://izd-mn.com/PDF/03MNNPM25.pdf (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.15862/03MNNPM25.

29. *Петров А. А.* Применение машинного обучения в автоматизированном обновлении картографического материала // Геодезия и картография. — 2024. — № 11. — С. 25—34. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1011-0-25-34.

30. *Рылякин Е. Г.*, *Костина В. И.* Средства производства при эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов // Концепт. — 2015. — № 6. — С. 156—160. URL: http://e-koncept.ru/2015/15205.htm (дата обращения: 18.08.2026).

31. *Вильданов А. Г.*, *Гильманов А. Ф.*, *Демьянов Д. Н.* Параметрируемая многомассовая модель грузового автомобиля // Автоматизация в промышленности. — 2025. — № 4. — С. 13—19.

32. *Ширяев А. А.*, *Мурзин В. М.*, *Черкасова Е. И.* Оценка эффективности продуктов трехмерного моделирования // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17. — № 9. — С. 314—316.

33. *Кузьмин М. И.*, *Кушнирук Д. И.*, *Аникин А. В.*, *Верба С. В.*, *Зубов Д. В.* Применение концепции цифрового двойника на этапах проектирования, моделирования и управления химическим процессом // Программные продукты и системы. — 2024. — Т. 37. — № 4. — С. 629—637. DOI: 10.15827/0236-235X.148.629-637.

34. *Gao L., Jia M., Liu D.* Process digital twin and its application in petrochemical industry // Journal of Software Engineering and Applications. 2022, vol. 15, no. 8, pp. 308—324. DOI: 10.4236/jsea.2022.158018.

35. *Grieves M., Vickers J.* Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. 2017, pp. 85—113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

36. *Терентьев А. О.* Цифровая химия: направления развития искусственного интеллекта в химической науке // Башкирский химический журнал. — 2026. — Т. 1. — № 1. — С. 7—16. DOI: 10.17122/bcj-2026-1-7-16.

37. *Oliveira L. M.*, *Dias R.*, *Rebello C. M.*, *Martins M. A.*, *Rodrigues A. E.*, *Ribeiro A. M.*, *Nogueira I. B.* Artificial intelligence and cyber-physical systems: A review and perspectives for the future in the chemical industry // AI. 2021, vol. 2, no. 3, pp. 429—443. DOI: 10.3390/ai2030027.

38. *Смирнов Е. А.* Информационная система для моделирования распространения загрязнения атмосферного воздуха с использованием ArcGIS / Актуальные вопросы технических наук: материалы I Международной научной конференции. — Пермь: Меркурий, 2011. — С. 27—31. URL: https://moluch.ru/conf/tech/archive/4/895 (дата обращения: 02.02.2026).

39. *Морозов В. П.* Анализ алгоритмов машинного обучения в задачах прогнозирования качества воздуха / Современные проблемы экологии и экологического образования: сборник научных статей. — М.: Изд-во РУДН, 2020. — С. 112—120.

40. *Железный С. В.* Использование методов машинного обучения для прогнозирования загрязненности атмосферного воздуха // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. — 2019. — № 3. — С. 45—52.

41. *Тангиев Б. Б.* Совершенствование геоинформационных технологий и автоматизированных систем экологического мониторинга по обеспечению безопасности акваэкосистемы региона (на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области). — СПб.: СПбГУВК, 2003. — 243 с.

42. *Папичев В. И.*, *Франтов А. Е.* Сравнительная оценка экологического воздействия на атмосферу при использовании конверсионных взрывчатых материалов // Экологические системы и приборы. — 2008. — № 2. — С. 55—58.

43. *Папичев В. И.*, *Франтов А. Е.* К вопросу оценки экологического воздействия на природную среду при применении конверсионных взрывчатых материалов // Взрывное дело. — 2010. — № 103-60. — С. 283—293.

44. *Анисимов В. Н.*, *Франтов А. Е.* Пылегазоподавление при крупномасштабном взрывании с применением конверсионных ВВ // Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов: сборник докладов. — М., 2007. — С. 246—250.

45. *Трубина Л. К.*, *Николаева О. Н.*, *Хлебникова Т. А.* Геопространственное моделирование экологической обстановки территории г. Новосибирска. — Новосибирск: СГУГиТ, 2022. — 175 с.

46. *Гусев Д. М.*, *Мельников П. А.*, *Шашенко В. А.* Использование искусственного интеллекта в качестве предиктивной модели распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 2. — С. 56—59. ГИАБ

REFERENCES

1. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. *Gorno-geologicheskie informatsionnye sistemy — istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie* [Mining and geological information systems: history of development and current state], Apatity, 2016, 196 p.

2. Karpik A. P. *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy: monografiya* [Methodological and technological foundations of geoinformation support for territories: monograph], Novosibirsk, 2004, 259 p.

3. Tsvetkov V. Ya. *Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii* [Geographic information systems and technologies], Moscow, Finansy i statistika, 1998, 288 p.

4. Kaputin Yu. E. *Informatsionnye tekhnologii planirovaniya gornykh rabot (dlya gornykh inzhenerov)* [Information technologies for mine planning: for mining engineers], Saint-Petersburg, Nedra, 2004, 424 p.

5. Morozova T. P. Prospects for the use of Russian digital design systems in the mining industry: GIS Geomix and Mineframe. *Innovations and Investments*. 2022, no. 5, pp. 132 — 135. [In Russ].

6. Dremin A. V., Velikanov V. S. Digital technologies for blasting operations: intelligent autonomous software and hardware complex of Davtech company for analyzing the particle-size distribution of rocks. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 6, pp. 57 — 62. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-57-62.

7. Volkov Yu. I., Seryi S. S., Gerasimov A. V. Prospects for the implementation of the GEOMIX GIS at mining enterprises. *Mine Surveying Bulletin*. 2012, no. 2, pp. 32 — 34. [In Russ].

8. Rada A. O., Peters K. I., Kuznetsov A. D. Design of drilling and blasting operations based on a 3D model of an extraction block. *Ugol'*. 2024, no. 6, pp. 87 — 91. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-87-91.

9. Peters K. I., Shcherbakova L. N., Fedulova E. A., Kuznetsova A. D., Burmin L. N. Experience of applying a 3D model in the mining industry: a case study of coal enterprises in Kemerovo Region–Kuzbass. *Ugol'*. 2024, no. 10, pp. 110 — 117. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-110-117.

10. Fadeev A. A., Zaborsky E. N., Bagdasaryan O. E. Digital solutions for drilling and blasting as a means of improving the efficiency and safety of operations during rock mass crushing. *Ugol'*. 2024, no. 12, pp. 99 — 102. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-99-102.

11. Nagovitsin O. V. *Kontseptsiya i metody formirovaniya gorno-geologicheskoy informatsionnoy sistemy (GGIS MINEFRAME)* [Concept and methods of developing a mining and geological information system (GGIS MINEFRAME)], Doctor's thesis, Ekaterinburg, 2018, 48 p.

12. Afanas'ev A. A. *Tsifrovaya transformatsiya promyshlennogo proizvodstva: teoreticheskie aspekty i politika ee realizatsii*: nauchniy doklad [Digital transformation of industrial production: theoretical aspects and implementation policy: research report], Moscow, 2024, 73 p.

13. Eremin N. A., Chernikov A. D., Stolyarov V. E. The role of information in digital transformation in drilling and construction of oil and gas wells. *Drilling and Oil*. 2022, no. 7 — 8, pp. 8 — 18. [In Russ].

14. Chetvertneva I. A., Teptereva G. A., Shavshukova S. Yu. Formation and development of drilling methods in Russia and abroad. *History and Pedagogy of Natural Science*. 2019, no. 3, pp. 33 — 39. [In Russ]. DOI: 10.24411/2226-2296-2019-10307.

15. Sosfenov D. A. The use of digital twins in the automotive industry: Russian and international experience. *Economics and Management*. 2023, vol. 29, no. 6, pp. 662 — 669. [In Russ]. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-6-662-669.

16. Koroteev D. D., Kim A. A., Vasiutin A. O. O. Prospects for the application of digital twins in the construction industry. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024, vol. 16, no. 2. [In Russ], available at: https://esj.today/PDF/12SAVN224.pdf (accessed 18.08.2026).

17. Artemov I. V., Nosyrev M. B. Digital twin technology and its application in the mining industry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024, no. 5, pp. 38 — 43. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332_2024_5_38_43.

18. Zolotarev O. V. pSeven Enterprise as a tool for managing digital twins in the mining industry. *Materialy konferentsii DATADVANCE-2022* [Proceedings of the DATADVANCE 2022 Conference] [In Russ], available at: https://datadvance.ru (accessed 18.08.2026).

19. Dzhomartov M., Bayramova Dzh. Development and application of interactive digital twins of equipment and infrastructure in mining. *Innovative Science*. 2025, no. 6-1, pp. 15 — 22. [In Russ].

20. Bykova V. N., Kim E., Gadzhaliev M. R., Musienko V. O., Orudzhev A. O., Turovskaya E. A. Application of a digital twin in the oil and gas industry. *Current Problems of Oil and Gas*. 2020, no. 1(28), pp. 8. [In Russ]. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712-2020-28-art8.

21. Suchok S. N., Korenev R. V., Kushmanov P. V. Digital twin of drilling as an operational environment for improving the efficiency of well construction. *Drilling and Oil*. 2021, no. 11, pp. 32—37. [In Russ].

22. Petrenko D. A., Subbotin S. A. IndorSoft BIM solutions for the design and operation of highways. *CAD and GIS for Highways*. 2015, no. 2(5), pp. 100—107. [In Russ]. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.15.

23. Klebanov A. F., Eremkin I. V., Gabusu P. A. Digital twins of control processes for highly automated mining and transport complexes. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 4, pp. 61—70. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-61-70.

24. Podolskaya T. V., Sotnikov A. G. Introduction of advanced digital technology in transport and logistics in modern conditions. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2024, vol. 14, no. 4, pp. 1479—1496. [In Russ]. DOI: 10.18334/vinec.14.4.121649.

25. Konovalova T. V., Nadiryan S. L., Kotenkova I. N., Kotsurba S. V. Introduction of blockchain technology into the activities of transport and logistics enterprises. *Humanities, Social and Economic Sciences and Social Sciences*. 2023, no. 6, pp. 240—243. [In Russ]. DOI: 10.23672/SAE.2023.23.13.022.

26. Benyamin O. D. Analysis of the advantages and problems of implementing neural networks in warehouse logistics: a case study of a finished-goods warehouse at a food-processing enterprise. *Economics, Entrepreneurship and Law*. 2024, no. 5, pp. 2521—2532. [In Russ]. DOI: 10.18334/epp.14.5.120912.

27. Razumovsky V. A. Critical industrial technologies: selection mechanism. *Journal of Economics and Entrepreneurship*. 2020, no. 3(116), pp. 118—124. [In Russ].

28. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya promyshlennykh predpriyatiy*: monografiya, pod nauch. red. M.Ya. Veselovskogo, N.S. Khoroshavinoy [Current state and prospects of scientific and technological development of industrial enterprises: monograph. Veselovsky M. Ya., Khoroshavina N. S. (eds.)], Moscow, Mir nauki, 2025, available at: https://izd-mn.com/PDF/03MNNPM25.pdf (accessed 18.08.2026). DOI: 10.15862/03MNNPM25.

29. Petrov A. A. Application of machine learning in the automated updating of cartographic materials. *Geodesy and Cartography*. 2024, no. 11, pp. 25—34. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1011-0-25-34.

30. Rylyakin E. G., Kostina V. I. Production equipment used in the operation of transport and technological machines and complexes. *Kontsept*. 2015, no. 6, pp. 156—160. [In Russ], available at: http://e-koncept.ru/2015/15205.htm (accessed 18.08.2026).

31. Vildanov A. G., Gilmanov A. F., Demyanov D. N. A parameterized multi-mass model of a truck. *Automation in Industry*. 2025, no. 4, pp. 13—19. [In Russ].

32. Shiryaev A. A., Murzin V. M., Cherkasova E. I. Evaluation of the effectiveness of three-dimensional modeling products. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014, vol. 17, no. 9, pp. 314—316. [In Russ].

33. Kuzmin M. I., Kushniruk D. I., Anikin A. V., Verba S. V., Zubov D. V. Application of the digital twin concept at the stages of designing, modeling, and controlling a chemical process. *Software Products and Systems*. 2024, vol. 37, no. 4, pp. 629—637. [In Russ]. DOI: 10.15827/0236-235X.148.629-637.

34. Gao L., Jia M., Liu D. Process digital twin and its application in petrochemical industry. *Journal of Software Engineering and Applications*. 2022, vol. 15, no. 8, pp. 308—324. DOI: 10.4236/jsea.2022.158018.

35. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. 2017, pp. 85—113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

36. Terentyev A. O. Digital chemistry: directions for the development of artificial intelligence in chemical science. *Bashkir Chemical Journal*. 2026, vol. 1, no. 1, pp. 7—16. [In Russ]. DOI: 10.17122/bcj-2026-1-7-16.

37. Oliveira L. M., Dias R., Rebello C. M., Martins M. A., Rodrigues A. E., Ribeiro A. M., Nogueira I. B. Artificial intelligence and cyber-physical systems: A review and perspectives for the future in the chemical industry. *AI*. 2021, vol. 2, no. 3, pp. 429—443. DOI: 10.3390/ai2030027.

38. Smirnov E. A. Information system for modeling the spread of atmospheric air pollution using ArcGIS. *Aktual'nye voprosy tekhnicheskikh nauk: materialy I Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Current Issues in Technical Sciences: Proceedings of the 1st International Scientific Conference], Perm, 2011, pp. 27—31. [In Russ], available at: https://moluch.ru/conf/tech/archive/4/895 (accessed 02.02.2026).

39. Morozov V. P. *Analiz algoritmov mashinnogo obucheniya v zadachakh prognozirovaniya kachestva vozdukha. Sovremennye problemy ekologii i ekologicheskogo obrazovaniya: sbornik nauchnykh statey*

[Analysis of machine-learning algorithms for forecasting air quality. Modern Problems of Ecology and Environmental Education: Collection of Scientific Papers], Moscow, Izd-vo RUDN, 2020, pp. 112—120.

40. Zhelezny S. V. Application of machine-learning methods for forecasting atmospheric air pollution. *Moscow State University Bulletin. Series 1: Mathematics. Mechanics*. 2019, no. 3, pp. 45—52. [In Russ].

41. Tangiev B. B. *Sovershenstvovanie geoinformatsionnykh tekhnologiy i avtomatizirovannykh sistem ekologicheskogo monitoringa po obespecheniyu bezopasnosti akvaekosistemy regiona (na primere Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti)* [Improvement of geoinformation technologies and automated environmental monitoring systems for ensuring the safety of the region's aquatic ecosystem: a case study of St. Petersburg and Leningrad Region], Saint-Petersburg, 2003, 243 p.

42. Papichev V. I., Frantov A. E. Comparative assessment of environmental impact on the atmosphere when using conversion explosives. *Ecological Systems and Devices*. 2008, no. 2, pp. 55—58. [In Russ].

43. Papichev V. I., Frantov A. E. On assessing the environmental impact on the natural environment when using conversion explosives. *Explosion technology*. 2010, no. 103—60, pp. 283—293. [In Russ].

44. Anisimov V. N., Frantov A. E. *Pylegazopodavlenie pri krupnomasshtabnom vzryvanii s primeneniem konversionnykh VV. Kompleksnaya utilizatsiya obychnykh vidov boepripasov: sbornik dokladov* [Dust and gas suppression during large-scale blasting using conversion explosives. Comprehensive Disposal of Conventional Types of Ammunition: Collection of Reports], Moscow, 2007, pp. 246—250.

45. Trubina L. K., Nikolaeva O. N., Khlebnikova T. A. *Geoprostranstvennoe modelirovanie ekologicheskoy obstanovki territorii g. Novosibirska* [Geospatial modeling of the environmental conditions of the territory of Novosibirsk], Novosibirsk, 2022, 175 p.

46. Gusev D. M., Melnikov P. A., Shashenko V. A. Use of artificial intelligence as a predictive model for the spread of pollutants in atmospheric air. *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 2, pp. 56—59. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Франтов Александр Евгеньевич[1] — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник,
e-mail: ya@afrantov.ru,ORCID ID: 0000-0001-7535-096X,
Шляпин Алексей Владимирович[1] — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,
e-mail: shlyapin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9442-0983,
Лапиков Иван Николаевич[1] — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
e-mail: itwent@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5106-0335,
Белоусов Федор Сергеевич[1] — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
e-mail: itwent@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3880-267X,
[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН.
Для контактов: Франтов А.Е., e-mail: ya@afrantov.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.E. Frantov[1], Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher,
e-mail: ya@afrantov.ru, ORCID ID: 0000-0001-7535-096X,
A.V. Shlyapin[1], Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,
e-mail: shlyapin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9442-0983,
I.N. Lapikov[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: itwent@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5106-0335,
F.S. Belousov[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: itwent@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3880-267X,
[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,
Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.E. Frantov, e-mail: ya@afrantov.ru.

Получена редакцией 08.09.2026; получена после рецензии 02.10.2026; принята к печати 20.10.2026.
Received by the editors 08.09.2026; received after the review 02.10.2026; accepted for printing 20.10.2026.