Научная статья
УДК 622.8:004.94; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-22-37

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

✉**Романевич Кирилл Викторович;**
Долматова Лилиана Вадимовна.
Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», Санкт-Петербург, Россия.
Яхеев Валерий Васильевич.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
✉***romanevichkirill@yandex.ru***

Аннотация. Рассматривается концепция динамического адаптивного цифрового двойника горнотехнических систем (вмещающего массива горных пород и конструкций подземных сооружений) для предупреждения чрезвычайных ситуаций при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, строительстве и эксплуатации инженерных подземных сооружений. Цифровой двойник горнотехнической системы формируется путем интеграции данных системы шахтного сейсмомониторинга с объемной конечно-элементной моделью напряженно-деформированного состояния массива и реализуется в виде единого вычислительного контура с квазинепрерывной актуализацией параметров.

Данные о координатах и энергетических характеристиках сейсмических событий используются для последовательной корректировки расчетной схемы, включая формирование локальных зон разупрочнения и перераспределения напряжений с учетом развития горных работ. Это позволяет оперативно выявлять участки концентрации напряжений и потенциальной геомеханической опасности.

Предлагаемый подход ориентирован на создание инструмента прогнозно-аналитической поддержки принятия решений и управления геодинамическими рисками в системе обеспечения безопасности шахт, рудников и подземных инженерных сооружений при их строительстве и эксплуатации. В работе приведены примеры разработанных моделей, рассматриваются направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: безопасность, чрезвычайные ситуации, шахта, рудник, массив горных пород, геомеханическая модель, напряженно-деформированное состояние, система шахтного сейсмомониторинга

Для цитирования: Романевич К.В., Долматова Л.В., Яхеев В.В. Цифровые двойники горнотехнических систем для предупреждения чрезвычайных ситуаций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 3 (79). С. 22–37. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-22-37

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Scientific article

DIGITAL TWINS OF MINING SYSTEMS FOR EMERGENCIES PREVENTION

✉**Romanevich Kirill V.;**
Dolmatova Liliana V.
Research institute of mining geomechanics and mine surveying – interdisciplinary scientific center «VNIMI», Saint-Petersburg, Russia.
Yakheev Valery V.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
✉***romanevichkirill@yandex.ru***

Abstract. The paper presents a concept for emergency prevention in underground mining based on a dynamic digital twin of a geotechnical system. The digital twin is developed through the integration of mine seismic monitoring data with a three-dimensional finite element model of the rock mass stress-strain state and is implemented as a unified computational framework with quasi-continuous parameter updating.

Information on the coordinates and energy characteristics of microseismic events is used for sequential correction of the numerical model, including the formation of local weakening zones and stress redistribution accounting for mining progress. This approach enables prompt identification of stress concentration areas and potentially hazardous geomechanical conditions.

The proposed methodology is aimed at developing a predictive and analytical decision-support tool for geodynamic risk management in coal mines, ore mines, and underground engineering structures during construction and operation. Examples of developed geotechnical system models are presented, and further research directions are outlined.

Keywords: safety, emergency situations, coal mine, ore mine, rock mass, geomechanical model, stress-strain state, mine seismic monitoring system

For citation: Romanevich K.V., Dolmatova L.V., Yakheev V.V. Digital twins of mining systems for emergencies prevention // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 3 (79). P. 22–37. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-22-37

Введение

Подземная разработка угольных и рудных месторождений, а также строительство и эксплуатация инженерных подземных сооружений сопровождается ростом геодинамических рисков, обусловленных увеличением глубины ведения горных работ, их интенсификацией, усложнением горно-геологических условий. Концентрация напряжений в массиве формирует предпосылки к развитию динамических явлений – горных ударов, внезапных выбросов и иных форм разрушения горных пород в динамической форме, представляющих угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Сохраняющийся уровень аварийности на объектах горной промышленности подтверждает необходимость совершенствования методов предупреждения опасных проявлений горного давления [1].

Базовым элементом системы обеспечения безопасности остается инструментальный мониторинг, прежде всего пассивные сейсмические системы, обеспечивающие непрерывную регистрацию сейсмической активности и объективную оценку текущего состояния массива в каждой его точке. Вместе с тем изолированное использование мониторинговых данных ограничивает возможности количественной интерпретации и прогноза.

Перспективным направлением является интеграция данных сейсмомониторинга с численным геомеханическим моделированием напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Формирование динамической адаптивной модели,

функционирующей в едином вычислительном контуре и регулярно актуализируемой по данным о ведении горных работ и инструментальным данным сейсмомониторинга, позволяет повысить достоверность оценки геомеханических рисков и обеспечить переход к проактивному предупреждению чрезвычайных ситуаций при ведении горных работ (рис. 1).



Рис. 1. **Алгоритм динамической адаптивной модели вмещающего массива**

В зарубежной научной литературе вопросы прогнозирования геодинамических явлений и повышения безопасности подземных работ рассматриваются через призму интеграции мониторинга, численного моделирования и интеллектуального анализа данных. Так, в работе [2] описываются современные подходы к развитию теории и практики предупреждения горных ударов и сопутствующих динамических проявлений, подчеркивается необходимость использования микросейсмических данных для построения прогностических моделей и оценки устойчивости подземных сооружений, анализируются механизмы возникновения динамических событий и обсуждаются методы анализа данных, включая пространственно-временную обработку сигналов и интеграцию с геомеханическими моделями, как основу для разработки цифровых прогнозно-аналитических систем.

В работе [3] цифровые двойники, представляющие собой виртуальные аналоги природных систем, рассматриваются как перспективный инструмент оценки сейсмической опасности и поддержки принятия решений при условии интеграции мониторинговых данных с высокопроизводительным численным моделированием, способным адаптироваться к изменяющейся динамике сейсмических процессов. Однако центральный тезис статьи – реализация полноценных цифровых двойников упирается в задачу экзамасштабных вычислений (exascale computing) – физически обоснованные симуляции сейсмических волн в 3D крайне вычислительно затратны.

В работе [4] показано, что интеграция данных сенсорного мониторинга, геоинформационной среды и численного моделирования в рамках цифрового двойника позволяет формировать единую оперативную платформу для оценки сейсмических рисков и поддержки принятия решений при чрезвычайных ситуациях в условиях городской инфраструктуры.

В отечественной научной литературе также наблюдается устойчивая тенденция к расширению применения инструментального мониторинга как ключевого источника информации о геодинамической активности массива. В работе [5] предложен комплексный методический подход, объединяющий построение цифровых геомеханических моделей месторождений полезных ископаемых и создание системы инструментального контроля, функционирующей в режиме верификации расчетных параметров – разработана структурная схема мониторинга, предусматривающая сопоставление результатов натурных геомеханических измерений с данными численного моделирования и последующую адаптацию модели к изменяющейся конфигурации горных работ.

В работе [6] обсуждаются современные цифровые технологии, включая автоматизацию сбора и обработки данных мониторинга, возможность интеграции разнородных источников информации и повышение информативности геомеханического контроля – выделяется потенциал цифровых платформ для поддержки геомеханического анализа, в том числе с применением вычислительных моделей и автоматизированной обработки.

В последние годы развитие концепции цифровых двойников обусловлено ростом вычислительных мощностей, внедрением технологий интернета вещей, развитием облачных сервисов и методов анализа больших данных. Широко рассматриваются концепции статического или квазистатического геологического цифрового двойника месторождений [7] и горнотехнических систем [8]. В работе [9] исследуется возможность применения концепции цифровых двойников к системам экологического мониторинга; предложена их классификация и обосновано использование типа, ориентированного на интеграцию потоков инструментальных данных. В качестве базового элемента рассматривается цифровая фабрика данных как аналог цифровой тени, обеспечивающая сбор, хранение и обработку информации о состоянии окружающей среды – подход апробирован на предприятиях угольной промышленности.

Вместе с тем развиваются системы контроля естественной и техногенной сейсмичности горнотехнических систем – в прикладных исследованиях [10, 11] рассматривается опыт применения системы шахтного сейсмомониторинга GITS для оценки сейсмической активности и локализации опасных зон во вмещающем массиве подземного рудника. В указанных работах подчеркивается практическая значимость непрерывного сейсмического мониторинга, но также отмечается ограниченность существующих алгоритмов прогнозирования сейсмособытий в части интеграции с моделями НДС массива и планами развития горных работ.

В настоящее время проводятся исследования, направленные на повышение точности прогноза удароопасности при интенсивной разработке месторождений на основе интегральных показателей сейсмического мониторинга, что способствует росту информативности оценки и уровня безопасности работ [12], также разрабатываются интеллектуальные методы для обработки и анализа данных шахтных сейсмостанций, предлагаются новые параметры и критерии комплексного прогноза динамических проявлений в массивах горных пород [13]. Таким образом, наблюдается четкая тенденция к переходу от изолированных инструментальных мониторинговых измерений в горнотехнических системах к интегрированным прогностическим интеллектуальным комплексам.

Этим, в том числе, подтверждается актуальность задачи создания адаптивных цифровых моделей – цифровых двойников горнотехнических систем, синхронизируемых с потоком данных шахтного сейсмомониторинга, конечной целью которых является разработка единой динамической системы предупреждения техногенных чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными геодинамическими явлениями.

Модели и методы исследования

В настоящее время Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ) осуществляет эксплуатацию и сопровождение систем сейсмического мониторинга GITS более чем 20 горнодобывающих угольных и рудных предприятий Российской Федерации, обеспечивая непрерывный региональный контроль геомеханического состояния массива горных пород [14, 15].

Для системы регионального контроля используется пакет прикладного программного обеспечения [16], позволяющий решать задачи:

– определения координат и сейсмической энергии сейсмособытий;

– ведения каталога сейсмособытий;

– построения карт сейсмической активности;

– построения карт очагов сейсмособытий;

– статистического анализа сейсмической активности при различных начальных условиях с построением графиков и таблиц;

– построения сводных таблиц за различные интервалы времени и по разным участкам контролируемого массива горных пород;

– построение карт достоверности регистрации и др.

Вычисления координат сейсмического события производят по временам первых вступлений прямых продольных волн, определенных с точностью не хуже 1–2 мс, минимум на пяти точках регистрации при условии хорошего окружения очага данными точками.

По записи события производят расчет координат (с использованием алгоритмов триангуляции по временам вступления волн) и вычисление сейсмической энергии по ряду соотношений. Известно, что соотношения для энергии выведены из одних и тех же предпосылок [17, 18], но различные допущения дают несколько вариантов конечных формул (1–3):

$$\mathrm{Ec} = \frac{\pi R_0^2 \rho V_s}{2}\left(k \sum_{i=1}^{2m} A_{Vpi}^2 T_{pi} + \sum_{i=1}^{2m} A_{Vsi}^2 T_{si}\right), \quad (1)$$

$$\mathrm{Ec} = \pi R_0^2 \rho V_s \left[(A_{Vp}^{max})^2 \tau_p + (A_{Vs}^{max})^2 \tau_s\right], \quad (2)$$

$$\mathrm{Ec} = \pi R_0^2 \rho V_s \, (A_{Vs}^{max})^2 \tau_s, \quad (3)$$

где R_0 – радиус референц-сферы, м; ρ – плотность горных пород; Vp, Vs – скорости продольной и поперечной волны, м/с; k – соотношение Vp/Vs; Avp, Avs – амплитуды скорости колебаний в продольной и поперечной волнах, м/с; Tp, Ts – период продольной и поперечной волны, с; τp, τs – длительность колебаний в продольной и поперечной волнах, с; m – число периодов.

На практике при расчете используют упрощенную формулу по поперечным волнам (3) или эмпирическую зависимость (4) [19]:

$$\lg E = 2{,}24 + 2{,}76 \lg \tau, \quad (4)$$

где τ – полная длительность записи по сейсмограмме, с.

Очаг сейсмического события не является точкой, а представляет собой область разрушения, форма и размеры которой (от изометричной до плоскостной и линейной) коррелируют с энергетическим классом события и определяют характер перераспределения напряжений в массиве горных пород. Для оценки размера очага при различных его формах используют эмпирические формулы (5, 6).

Для сферы:

$$Rr = 1{,}85E_c^{0{,}186}. \quad (5)$$

Для плоскости (разрыва):

$$L = 2{,}9E_c^{0{,}24}; W = 2{,}0E_c^{0{,}21}, \quad (6)$$

где *Ec* – сейсмическая энергия события, Дж; *Rr* – радиус сферы, охватывающий зону неупругих деформаций, м; *L* – длина разрыва, м; *W* – ширина разрыва, м.

Современные системы шахтного сейсмического мониторинга [14–16] позволяют определять координаты гипоцентров сейсмособытий с точностью до 1–15 м по XYZ и их энергию, а также оценивать размеры очагов и характер распространения энергии в массиве горных пород. Это дает возможность прогнозировать влияние геодинамической активности массива на устойчивость горных выработок, что является главным аспектом обеспечения безопасности и снижает риск развития чрезвычайных ситуаций в подземном строительстве.

Дальнейшая трансформация систем шахтного сейсмомониторинга заключается в интеграции с технологиями компьютерного инженерного анализа CAE (Computer-Aided Engineering), основанными на применении специализированного программного обеспечения для численного моделирования, верификации и оптимизации конструкций и технологических процессов [20]. С их помощью выполняются геомеханические расчеты НДС массива, синхронизация и интерактивный пересчет геомеханических параметров массива при непрерывном поступлении новой информации по системе автоматизированного геодинамического мониторинга.

При таком подходе каждый элемент объема массива рассматривается как объект инструментального контроля, а актуализированные данные о сейсмической активности и параметрах НДС передаются в многопользовательскую аналитическую среду. Это обеспечивает синхронизацию расчетной геомеханической модели с фактическими данными мониторинга в режиме, близком к реальному времени.

Цифровой двойник угольной шахты, рудника, транспортного тоннеля, карьера или иного объекта подземного строительства – то есть его динамическая цифровая модель, синхронизированная с данными инструментального мониторинга и численных расчетов, функционирует как интегрированная система наблюдения, моделирования и прогноза геодинамических процессов, обеспечивая оперативную оценку состояния массива и поддержку принятия инженерных решений.

Примером начатых работ в данном направлении может быть опыт интеграции GITS с численной моделью массива горных пород с применением CAE Fidesys, предназначенного для инженерного анализа прочности и решения геомеханических задач [21, 22].

В работе [21] выполнено численное моделирование влияния локализованных сейсмособытий различной энергии (10^0, 10^1 и 10^2 кДж) на НДС массива горных пород с подземной выработкой. Очаг моделировался как зона разупрочнения с кратным (в 10 и 100 раз) снижением упруго-прочностных характеристик, расположенная вблизи контура выработки при различных вариантах ее пространственного положения (рис. 2). Установлено, что параметры очага – его размеры, энергия, положение относительно выработки и степень разупрочнения – влияют на перераспределение главных напряжений. Показано, что формирование зоны сейсмособытия приводит к изменению НДС не только в непосредственной близости к выработке, но и в окружающем массиве, что подтверждает необходимость учета зарегистрированных событий при геомеханическом анализе. В результате была получена качественная зависимость между характеристиками очага сейсмического события и масштабом напряженных зон, создающая основу для последующего количественного описания и интеграции результатов с данными сейсмомониторинга.

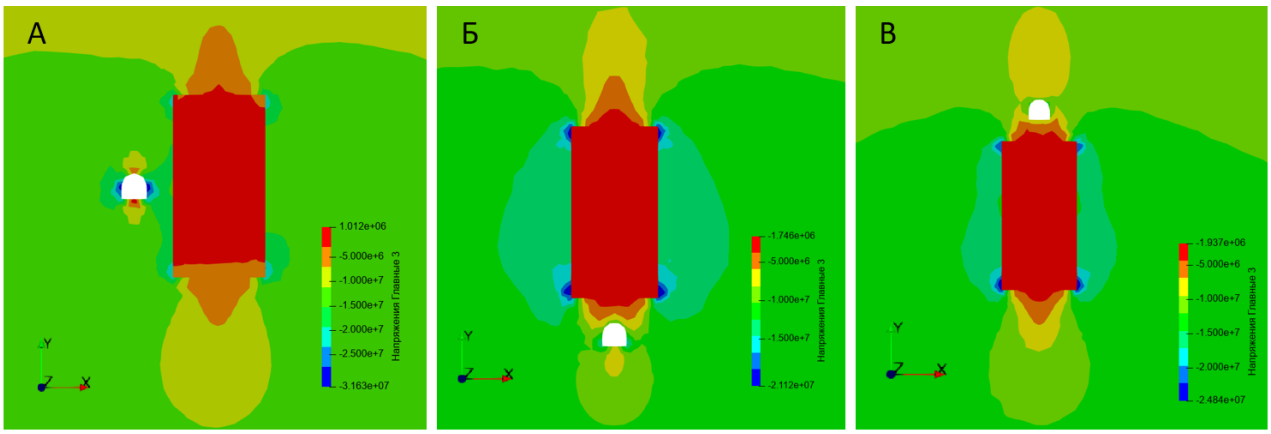


Рис. 2. **Моделирование НДС массива горных пород с выработкой и сейсмособытия в форме разрыва шириной 11,4 и длиной 21,2 на расстоянии 5 м от выработки: А – сейсмособытие в стороне от выработки; Б – сейсмособытие над выработкой; В – сейсмособытие под выработкой – распределение главных напряжений (максимальных), МПа**

В работе [22] выполнено трехмерное упругое моделирование влияния локализованных сейсмособытий на НДС массива с подземной выработкой с учетом гравитационной нагрузки и глубины порядка 450 м. Исследовано влияние объема очага ($10^2 \div 10^3$ м³), его положения (сбоку и над выработкой) и степени разупрочнения (в 10 и 100 раз) на перераспределение главных напряжений. Количественно определены максимальные отклонения главных напряжений в окрестности выработки, показана их зависимость от геометрии и параметров очага. Установлено, что зона влияния сейсмособытия распространяется на расстояние порядка 3-4 характерных размеров очага, затрагивая как область выработки, так и ненарушенный массив. Обоснована необходимость комплексного анализа всех главных напряжений и дальнейшего уточнения количественных зависимостей для интеграции результатов с данными мониторинга.

В настоящей работе рассмотрена комбинированная геомеханическая постановка, отражающая воздействие не единичного локализованного сейсмособытия, а интегральное влияние зоны накопленного повреждения массива. С этой точки зрения рассмотрена реальная аварийная ситуация, произошедшая на одной из угольных шахт Кузбасса.

В июле 2022 г. вентиляционный штрек, пройденный в угольном пласте мощностью 10 м на глубине порядка 450 м, был поврежден в результате природного землетрясения, эпицентр которого находился за пределами шахтного поля. Строение массива было осложнено наличием тектонического нарушения мощностью 1 м, подсекающего угольный пласт вблизи горных выработок, в том числе указанного вентиляционного штрека.

По данным системы сейсмомониторинга и рассчитанным координатам гипоцентров, впоследствии было установлено, что пространственная локализация сейсмособытий в период с января по апрель 2020 г. сформировала протяженную ослабленную зону – сейсмическую поверхность или сейсмоплоскость [23, 24], интерпретируемую как развивающийся разрыв (зона активного трещинообразования) или активизация существующей ранее зоны деструкции массива. Формирование структуры из скопления сейсмических событий, по одной из версий, привело к дополнительному ослаблению массива горных пород, а произошедшее позднее землетрясение вызвало подвижку по сформировавшимся ослабленным зонам. В момент землетрясения произошло смещение бортов и почвы вентиляционного штрека – аварийное разрушение горной выработки с тяжелыми последствиями.

На рис. 3 представлен процесс накопления энергии во времени зарегистрированных сейсмических событий в пределах рассматриваемой горнотехнической системы (угольной шахты).

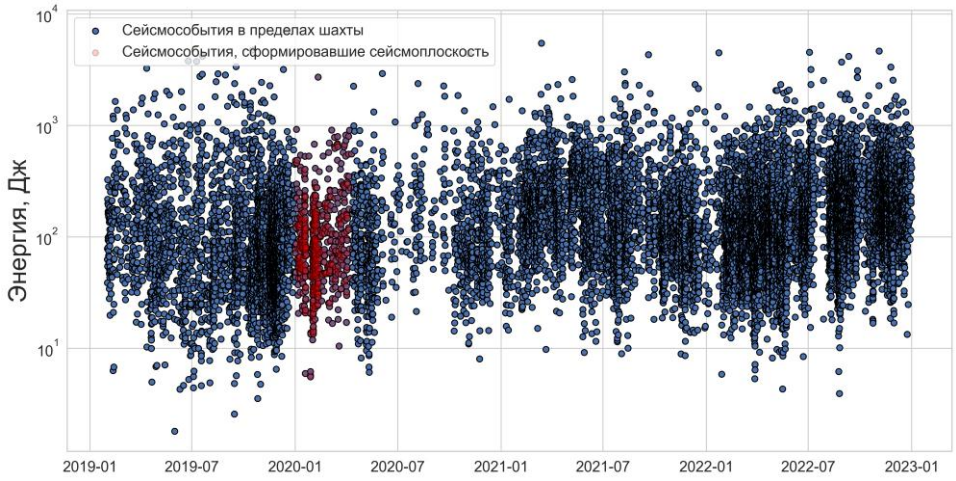


Рис. 3. **Естественные сейсмические события (без учета взрывов) на рассматриваемой шахте в 2019–2022 гг.**

График отражает распределение количества сейсмособытий и их энергетических характеристик, что позволяет оценить интенсивность сейсмической активизации за рассматриваемый период. Отдельно выделены сейсмособытия, сформировавшие новое разрывное нарушение в массиве. Следует отметить, что после формирования данного разрывного нарушения наблюдается общее снижение уровня сейсмической активности в пределах всего вмещающего массива. Представленные данные были использованы для параметризации модели разупрочненной области при последующем численном моделировании НДС массива.

На рис. 4 показано сечение вмещающего массива горных пород – серым цветом показан угольный пласт; красным обозначено тектоническое нарушение, выявленное в процессе проходки и геологоразведочных работ; синими точками представлены очаги сейсмических событий, зарегистрированные в период с 1 января по 10 апреля 2020 г., с указанием их энергии (Дж); зеленой линией показана моделируемая поверхность, образованная сейсмическими событиями; оранжевым и розовым показаны сечения штреков в пределах пласта.

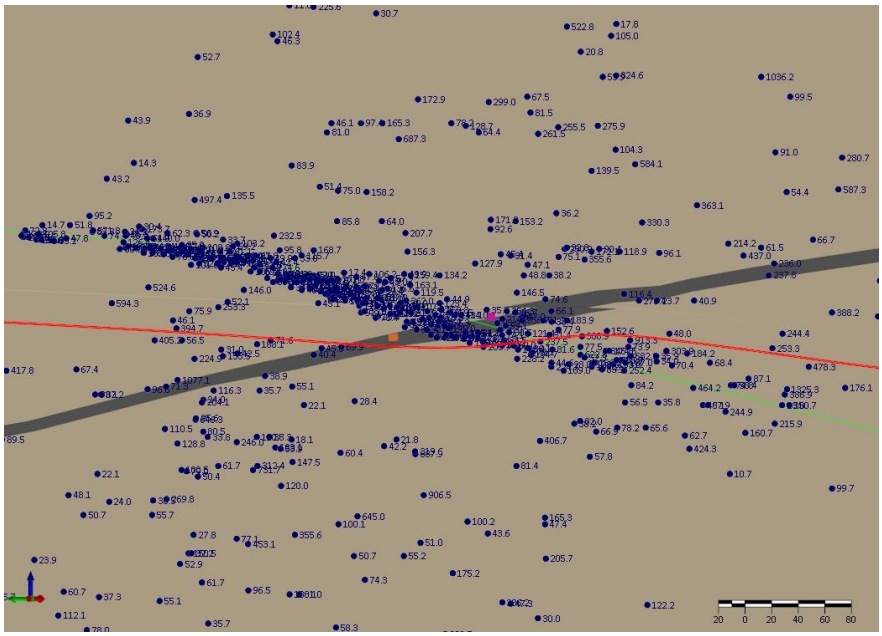


Рис. 4. **Сечение массива горных пород. Аварийное разрушение произошло в горной выработке, обозначенной розовым цветом**

На основе оцененных размеров очагов единичных сейсмособытий сейсмоплоскость моделируется как зона пониженных упруго-прочностных характеристик, геометрические параметры которой задаются пространственной концентрацией части зарегистрированных событий. Такой подход позволяет учесть кумулятивный эффект разупрочнения и связанное с ним перераспределение напряжений, переходя от анализа единичного очага сейсмособытия к исследованию эволюционирующей дискретной структуры, оказывающей влияние на НДС массива и устойчивость горных выработок.

На рис. 5 показана объемная модель участка массива горных пород – серым цветом показан угольный пласт; красным обозначено тектоническое нарушение, выявленное в процессе проходки и геологоразведочных работ; зеленым – показана моделируемая поверхность (сейсмоплоскость), образованная сейсмическими событиями; синими точками представлены очаги сейсмических событий, зарегистрированные в период с 1 января по 10 апреля 2020 г., с указанием их энергии (Дж), цифрами 1 и 2 показаны оси горных выработок.

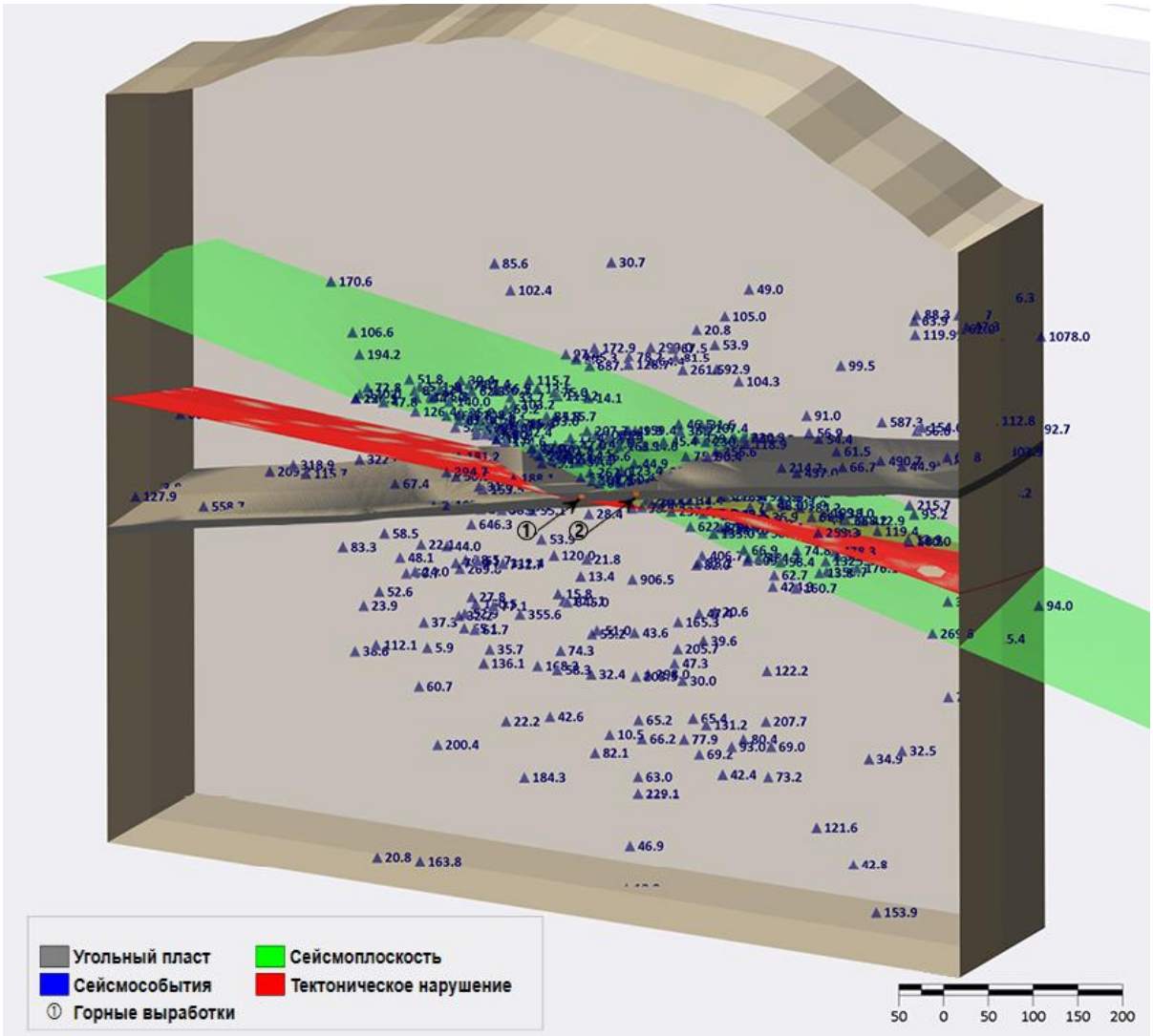


Рис. 5. **Объемная модель участка массива горных пород. Аварийное разрушение произошло в горной выработке, обозначенной цифрой 2**

В рамках представленной пространственно-энергетической модели был произведен расчет НДС массива горных методом конечных элементов в CAE Fidesys (Fidesys Professional версии 6.1 и CAE Fidesys HPC версии 6.1). Получены поля распределений максимальных сжимающих и растягивающих напряжений.

Далее в расчет была добавлена область, соответствующая скоплению сейсмических событий по данным сейсмостанции GITS. Прочностные свойства этой области были искусственно ослаблены по сравнению с вмещающим массивом на двух этапах расчета в 10 и в 100 раз, аналогично подходам, представленным в работах [21, 22].

Результаты исследования и их обсуждение

Добавление в модель ослабленной зоны, картированной по сейсмособытиям в виде сейсмоплоскости приводит к перераспределению полей напряжений: в кровле выработок формируются зоны растяжения до 8 МПа, а в бортах фиксируется рост сжимающих напряжений до 25 МПа, сопоставимых с пределом прочности пород (рис. 6).

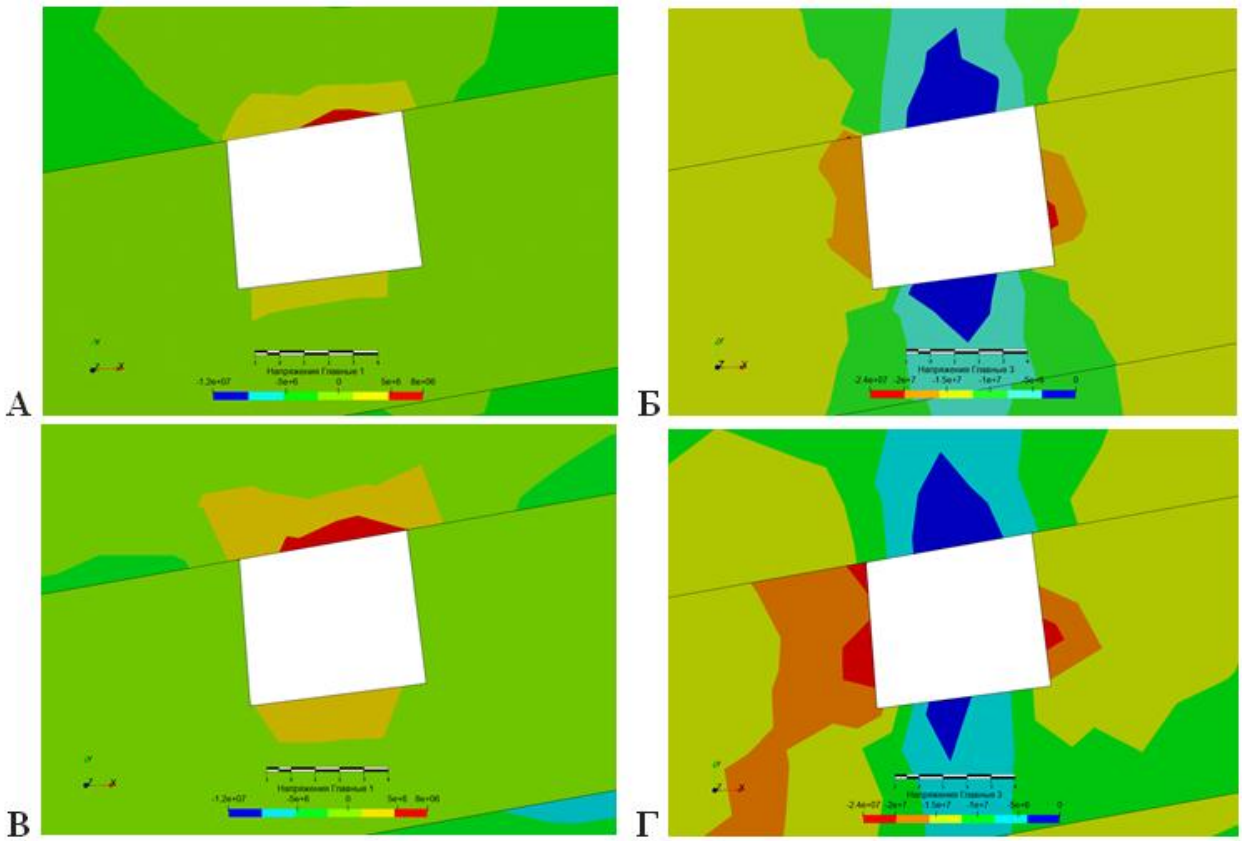


Рис. 6. **Расчет НДС методом конечных элементов:**
А, Б – главное минимальное и главное максимальное напряжение (МПа) без введения в расчет ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость; В, Г – те же параметры после введения в расчет ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость

После расчета значений главных напряжений вблизи горных выработок определялся коэффициент запаса устойчивости в каждой точке сплошного массива по критерию Кулона-Мора (7).

$$\tau = C + \sigma tg\varphi, \quad (7)$$

где τ – предел прочности породы по касательным напряжениям, МПа; C – сцепление, МПа; σ – нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.

В практических расчетах коэффициента запаса устойчивости вместо выражения (7) используется функция прочности, получаемая из уравнения огибающей предельных кругов Мора (8):

$$2Ccos\varphi + (\sigma_1 + \sigma_3)sin\varphi \geq (\sigma_1 + \sigma_3), \quad (8)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно главные максимальные и минимальные напряжения, действующие в массиве пород, МПа.

Таким образом, коэффициент запаса устойчивости в каждой точке сплошного массива вычисляется по формуле (9):

$$К_у = \frac{2Ccos\varphi+(\sigma_1+\sigma_3)sin\varphi}{(\sigma_1+\sigma_3)}. \quad (9)$$

Значения коэффициента запаса устойчивости Ку<1 характеризуют области запредельного деформирования пород. На рис. 7, 8 представлены результаты численного моделирования распределения коэффициента Ку как без учета ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость, так и с ее учетом при снижении прочностных характеристик в пределах данной зоны в 10 и 100 раз.

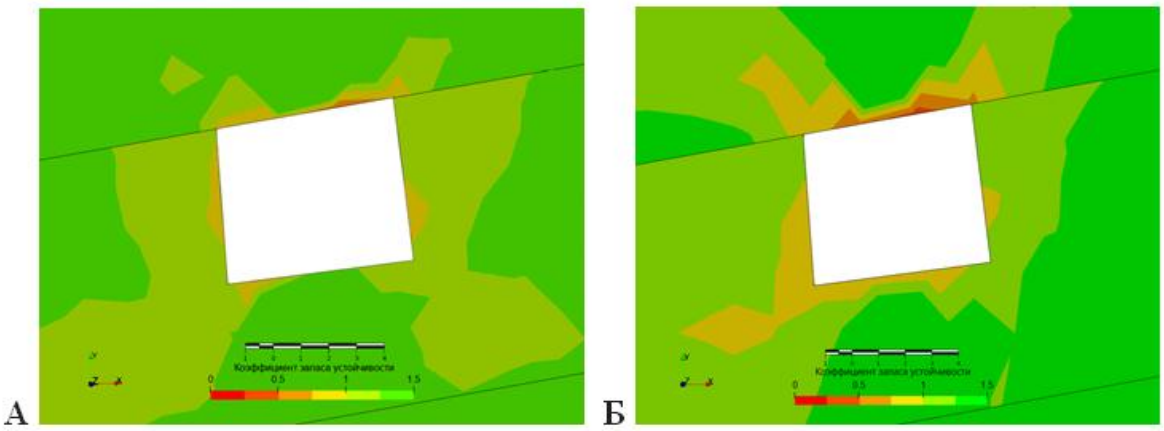


Рис. 7. **Коэффициент запаса устойчивости А – без введения в расчет ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость; Б – тот же параметр, после введения в расчет ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость со значением ослабления Е10**

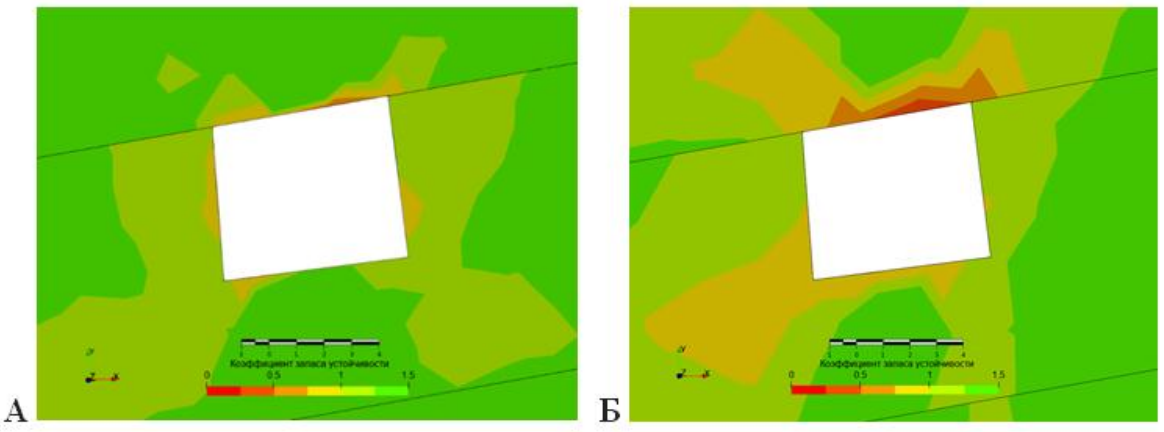


Рис. 8. **Коэффициент запаса устойчивости А – без введения в расчет ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость; Б – тот же параметр, после введения в расчет ослабленной зоны, моделирующей сейсмоплоскость со значением ослабления Е100**

Анализ результатов расчета показывает, что даже в исходном состоянии, без введения в модель сейсмоплоскости, устойчивость массива находилась в предельном состоянии: значения коэффициента Ку достигали 0,6–0,7, что свидетельствует о близости к потере устойчивости. Введение ослабленной зоны приводит к существенной деградации устойчивости участка вмещающего массива: значения Ку снижаются до 0,3–0,5.

В ходе анализа представленных результатов установлено, что степень ослабления в зоне сейсмоплоскости (в 10 или в 100 раз относительно нетронутого массива) не оказывает принципиального влияния на итоговое распределение коэффициента устойчивости. Данный факт свидетельствует о том, что само наличие ослабленного участка массива, моделирующего сейсмоплоскость, является определяющим фактором снижения устойчивости выработки в зоне влияния.

Результаты проведенного моделирования подтверждаются фактическими наблюдениями: аварийное разрушение выработки произошло преимущественно по определенным моделью ослабленным зонам, что свидетельствует о достоверности выполненных расчетов и адекватности принятой геомеханической модели горнотехнической системы.

Заключение

Предложенная в работе концепция реализует переход от статических геомеханических моделей напряженно-деформированного состояния массива горных пород к динамически актуализируемым геомеханическим моделям – цифровым двойникам горнотехнических систем.

Учет единичных сейсмических событий и их кластеров позволяет своевременно выявлять зоны повышенного риска, формирующиеся во вмещающем массиве горных пород, и выполнять их ранжирование по степени опасности для горных выработок в зоне влияния. Интеграция потока данных, поступающих с автоматизированных систем шахтного сейсмического мониторинга с динамическим численным моделированием напряженно-деформированного состояния массива горных пород, является эффективным инструментом предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, связанных с опасными геодинамическими явлениями на горных предприятиях и в инженерных подземных сооружениях.

Перспективной представляется возможность внедрения разработанной методики на шахтах, рудниках и других ответственных подземных объектах в составе автоматизированных систем управления безопасностью, в части геодинамического контроля. Это обеспечит реализацию функций прогнозирования развития опасных геомеханических процессов и поддержки принятия решений при ведении горных работ и эксплуатации горнотехнических систем.

Использование актуализируемых расчетных моделей НДС вмещающего массива позволит повысить обоснованность управленческих решений, направленных на снижение риска аварий, предотвращение разрушений горных выработок и обеспечение устойчивого функционирования объектов в условиях воздействия опасных геодинамических факторов, как природного, так и техногенного генезиса. Вместе с тем внедрение данного подхода потребует использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов для обеспечения оперативности расчетов.

Список источников

1. Ломов М.А. Аварии в горной промышленности в России, произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. Контроль горного давления на месторождении «Южное» (Приморский край) // Проблемы недропользования. 2023. № 1 (32). С. 85–94. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.085

2. Wang Ch. Evolution, Monitoring and Predicting Models of Rockburst. Springer, Singapore, 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-7548-3

3. Harnessing the potential of digital twins in seismology / L. Dal Zilio [et al.] // Nat Rev Earth Environ. 2023. № 4. P. 510–512. DOI: 10.1038/s43017-023-00469-y

4. Korkmaz M., Zulfikar A.C., Demirkesen S. Leveraging digital twins as a common operating picture for disaster management: case of seismic hazards // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2024. № 13. P. 430. DOI: 10.3390/ijgi13120430

5. Опыт применения цифровых геомеханических моделей при освоении рудных месторождений Сибири / А.П. Хмелинин [и др.] // Горная промышленность. 2023. № 5S. P. 25–34. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-25-34

6. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий / И.Ю. Рассказов [и др.] // Горная промышленность. 2023. № 5S. P. 18–24.

7. Наговицын О.В., Степачева А.В. Формирование цифрового двойника месторождения твердых полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 6. С. 171–180. DOI: 10.15372/FTPRPI20210616

8. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5-2. С. 31–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31

9. Потапов В.П., Попов С.Е., Счастливцев Е.Л. Цифровые двойники: стратегии и подходы к созданию систем экологического мониторинга // Вычислительные технологии. 2023. № 28 (3). P. 167–181. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.3.010

10. Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный» / А.А. Вьюнников [и др.] // Горная промышленность. 2024. № 3S. P. 26–31. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31

11. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Романевич К.В. Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа натурных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» // Горная промышленность. 2025. № 2. P. 88–95. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-00-00

12. Разумов Е.Е. Совершенствование метода прогнозирования удароопасности по результатам сейсмического мониторинга при интенсивной отработке угольных пластов: автореф. дис. … канд. техн. наук. Кемерово, 2025. 130 с.

13. Рассказов И.Ю. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга для раннего предупреждения горных ударов и снижения геодинамического риска // Цифровые технологии в горном деле. Апатиты: Изд-во Федерально-исследовательского центра Кольского научного центра РАН, 2025. С. 82.

14. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» / С.Н. Мулев [и др.]. Уголь. 2022. № 12 (1161). С. 88–93.

15. Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Гаврилов А.Г. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении // Горная промышленность. 2023. № S1. P. 90–95. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95

16. Питаль М.Н., Мулев С.Н. Программный комплекс GITS2: руководство по эксплуатации. СПб.: ВНИМИ, 2024. 117 с.

17. Винокур Б.Ш., Неупокоев В.А. К вопросу об оценке энергии сейсмоакустических импульсов при разрушении угольных целиков незначительных размеров. ВНИМИ, Ленинград, 1974.

18. Методы детального изучения сейсмичности / В.И. Бунэ [и др.] // Труды ИФЗ. 1960. № 9.

19. Ломакин В.С. Региональный прогноз удароопасности на основе сейсмологических исследований: дис. … канд. техн. наук. Л.: ВНИМИ, 1984.

20. Соннов М.А., Котиков Д.А., Куранов А.Д. Применение CAE Fidesys в решении геомеханических задач // Горная промышленность. 2018. № 5 (141). С. 90. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92

21. Романевич К.В., Мулев С.Н., Иванов Д.А. Определение области влияния микросейсмического события на массив горных пород в процессе сейсмомониторинга угольных шахт и рудников. Новые идеи в науках о Земле: в 9-ти т.: материалы XI Междунар. науч. конф. М.: Изд-во МГРИ, 2025. Т. 1. 2025. С. 152–156.

22. Романевич К.В., Мороз Н.Е., Иванов Д.А. Моделирование влияния сейсмособытий на напряженно-деформированное состояние массива горных пород при подземной разработке месторождений // Проблемы недропользования. 2025. № 2 (45). С. 69–79. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.069

23. Investigation of microseismic monitoring of and precursor information on roof collapse / Yu. Chen [et al.] // Appl. Sci. 2023. № 13. P. 11307. DOI: 10.3390/app132011307

24. Mulev S., Romanevich K., Taratinsky G. Identification of seismic surface development and geodynamic risk forecast in coal and ore mines // International Journal of Sustainability and Rick Control. 2025. Vol. 1. № 1 (1). P. 66–97.

References

1. Lomov M.A. Avarii v gornoj promyshlennosti v Rossii, proizoshedshie vsledstvie dinamicheskih proyavlenij v gornom massive. Kontrol' gornogo davleniya na mestorozhdenii «Yuzhnoe» (Primorskij kraj) // Problemy nedropol'zovaniya. 2023. № 1 (32). S. 85–94. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.085

2. Chunlai Wang Evolution, Monitoring and Predicting Models of Rockburst. Springer, Singapore, 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-7548-3

3. Harnessing the potential of digital twins in seismology / L. Dal Zilio [et al.] // Nat Rev Earth Environ. 2023. № 4. P. 510–512. DOI: 10.1038/s43017-023-00469-y

4. Korkmaz M., Zulfikar A.C., Demirkesen S. Leveraging digital twins as a common operating picture for disaster management: case of seismic hazards // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2024. № 13. P. 430. DOI: 10.3390/ijgi13120430

5. Opyt primeneniya cifrovyh geomekhanicheskih modelej pri osvoenii rudnyh mestorozhdenij Sibiri / A.P. Hmelinin [i dr.] // Gornaya promyshlennost'. 2023. № 5S. P. 25–34. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-25-34

6. Sovershenstvovanie metodov i sredstv geomekhanicheskogo monitoringa na osnove cifrovyh tekhnologij / I.Yu. Rasskazov [i dr.] // Gornaya promyshlennost'. 2023. № 5S. P. 18–24.

7. Nagovicyn O.V., Stepacheva A.V. Formirovanie cifrovogo dvojnika mestorozhdeniya tverdyh poleznyh iskopaemyh // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2021. № 6. S. 171–180. DOI: 10.15372/FTPRPI20210616

8. Zaharov V.N., Kubrin S.S. Cifrovaya transformaciya i intellektualizaciya gornotekhnicheskih sistem // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2022. № 5-2. S. 31–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31

9. Potapov V.P., Popov S.E., Schastlivcev E.L. Cifrovye dvojniki: strategii i podhody k sozdaniyu sistem ekologicheskogo monitoringa // Vychislitel'nye tekhnologii. 2023. № 28 (3). P. 167–181. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.3.010

10. Sejsmicheskij monitoring i ocenka geodinamicheskih processov pri vedenii gornyh rabot v usloviyah podzemnogo rudnika «Internacional'nyj» / A.A. V'yunnikov [i dr.] // Gornaya promyshlennost'. 2024. № 3S. P. 26–31. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31

11. Moroz N.E., Gendler S.G., Romanevich K.V. Ocenka opasnosti gazodinamicheskih yavlenij na osnove analiza naturnyh i laboratornyh issledovanij skorostej rasprostraneniya uprugih voln vo vmeshchayushchih gornyh porodah kimberlitovoj trubki «Internacional'naya» // Gornaya promyshlennost'. 2025. № 2. P. 88–95. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-00-00

12. Razumov E.E. Sovershenstvovanie metoda prognozirovaniya udaroopasnosti po rezul'tatam sejsmicheskogo monitoringa pri intensivnoj otrabotke ugol'nyh plastov: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. Kemerovo, 2025. 130 s.

13. Rasskazov I.Yu. Sovershenstvovanie metodov i sredstv geomekhanicheskogo monitoringa dlya rannego preduprezhdeniya gornyh udarov i snizheniya geodinamicheskogo riska // Cifrovye tekhnologii v gornom dele. Apatity: Izd-vo Federal'no-issledovatel'skogo centra Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2025. S. 82.

14. Monitoring napryazhennogo sostoyaniya sejsmicheskimi i raschetnymi metodami na shahtah AO «Vorkutaugol'» / S.N. Mulev [i dr.]. Ugol'. 2022. № 12 (1161). S. 88–93.

15. Rukavishnikov G.D., Mulyov S.N., Gavrilov A.G. Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya sistemy sejsmicheskogo monitoringa GITS na Tashtagol'skom zhelezorudnom mestorozhdenii // Gornaya promyshlennost'. 2023. № S1. P. 90–95. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95

16. Pital' M.N., Mulev S.N. Programmnyj kompleks GITS2: rukovodstvo po ekspluatacii. SPb.: VNIMI, 2024. 117 s.

17. Vinokur B.Sh., Neupokoev V.A. K voprosu ob ocenke energii sejsmoakusticheskih impul'sov pri razrushenii ugol'nyh celikov neznachitel'nyh razmerov. VNIMI, Leningrad, 1974.

18. Metody detal'nogo izucheniya sejsmichnosti / V.I. Bune [i dr.] // Trudy IFZ. 1960. № 9.

19. Lomakin V.S. Regional'nyj prognoz udaroopasnosti na osnove sejsmologicheskih issledovanij: dis. … kand. tekhn. nauk. L.: VNIMI, 1984.

20. Sonnov M.A., Kotikov D.A., Kuranov A.D. Primenenie CAE Fidesys v reshenii geomekhanicheskih zadach // Gornaya promyshlennost'. 2018. № 5 (141). S. 90. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92

21. Romanevich K.V., Mulev S.N., Ivanov D.A. Opredelenie oblasti vliyaniya mikrosejsmicheskogo sobytiya na massiv gornyh porod v processe sejsmomonitoringa ugol'nyh shaht i rudnikov. Novye idei v naukah o Zemle: v 9-ti t.: materialy XI Mezhdunar. nauch. konf. M.: Izd-vo MGRI, 2025. T. 1. 2025. S. 152–156.

22. Romanevich K.V., Moroz N.E., Ivanov D.A. Modelirovanie vliyaniya sejsmosobytij na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massiva gornyh porod pri podzemnoj razrabotke mestorozhdenij // Problemy nedropol'zovaniya. 2025. № 2 (45). S. 69–79. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.069

23. Investigation of microseismic monitoring of and precursor information on roof collapse / Yu. Chen [et al.] // Appl. Sci. 2023. № 13. P. 11307. DOI: 10.3390/app132011307

24. Mulev S., Romanevich K., Taratinsky G. Identification of seismic surface development and geodynamic risk forecast in coal and ore mines // International Journal of Sustainability and Rick Control. 2025. Vol. 1. № 1 (1). P. 66–97.

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 14.04.2026; одобрена после рецензирования: 20.05.2026;
Принята к публикации: 21.07.2026
The information about article:
The article was submitted to the editorial office: 14.04.2026; approved after review: 20.05.2026;
Accepted for publication: 21.07.2026

Информация об авторах:
Романевич Кирилл Викторович, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований, ученый секретарь института АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ» (199178, Санкт-Петербург, В.О. Малый пр., д. 58, лит. А (пом. 14Н), кандидат технических наук, e-mail: romanevichkirill@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-2052-7816, SPIN-код: 2750-0427
Долматова Лилиана Вадимовна, ведущий инженер-геомеханик АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ» (199178, Санкт-Петербург, В.О. Малый пр., д. 58, лит. А (пом. 14Н), e-mail: gabitova.liliana@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0000-7510-0039, SPIN-код: 3918-8780
Яхеев Валерий Васильевич, профессор кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, e-mail: yakvaleri@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6822-5108, SPIN-код: 7607-9304

Information about the authors:
Romanevich Kirill V., a leading researcher of laboratory of geophysical research, scientific secretary of the institute of JSC «Scientific research institute of mining geomechanics and surveying «VNIMI» interdisciplinary research center (199178, Saint-Petersburg, V.O. Maly ave., 58, lit. A (room 14N), candidate of technical sciences, e-mail: romanevichkirill@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-2052-7816, SPIN: 2750-0427
Dolmatova Liliana V., leading geomechanical engineer of JSC «Scientific research institute of mining geomechanics and surveying «VNIMI» interdisciplinary research center (199178, Saint-Petersburg, V.O. Maly ave., 58, lit. A (room 14H), e-mail: gabitova.liliana@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0000-7510-0039, SPIN: 3918-8780
Yakheev Valery V., professor at the department of mine rescue and explosion safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, e-mail: yakvaleri@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6822-5108, SPIN-код: 7607-9304