

Разработка динамической адаптивной геомеханической модели массива горных пород с актуализацией по данным шахтной сейсмостанции GITS в CAE Fidesys

К.В. Романевич¹ ✉, М.А. Соннов², С.Н. Мулев¹, Л.В. Долматова¹, Г.Д. Рукавишников¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

✉ romanevichkirill@gmail.com

Резюме: Рассматривается концепция разработки динамической адаптивной геомеханической модели массива горных пород, интегрированной с системой шахтного сейсмомониторинга GITS и реализуемой в программной среде конечно-элементного анализа CAE Fidesys. Цель исследования заключается в формировании расчетного инструмента, обеспечивающего квазинепрерывную актуализацию напряженно-деформированного состояния массива с учетом развития горных работ и регистрируемых микросейсмических событий различной энергии. Предлагаемый подход основан на построении трехмерной конечно-элементной модели, описывающей текущее геомеханическое состояние массива с учетом конфигурации очистных и подготовительных выработок, положения очистного забоя и этапности отработки месторождения. В отличие от ранее разработанных алгоритмов, ориентированных на оценку влияния отдельных сейсмособытий, в настоящей работе ставится задача создания единого вычислительного контура, в котором данные о координатах и энергетических параметрах событий, поступающие от системы GITS, используются для последовательной корректировки расчетной схемы. Корректировка может включать изменение локальных упруго-прочностных характеристик, формирование зон разупрочнения и перераспределение напряжений вблизи очагов сейсмособытий. В результате реализуется итерационная процедура обновления модели с последующим пересчетом напряженно-деформированного состояния, что позволяет формировать актуализированную картину распределения главных напряжений и выявлять зоны потенциальной геомеханической опасности. Предполагается, что такая модель может рассматриваться как цифровой двойник массива, отражающий его пространственно-временную эволюцию. Приводится пример практического применения предлагаемого подхода для одной из шахт Кузбасса. Проведенное исследование определяет направления дальнейших исследований, предполагающих создание инструмента оперативного управления геомеханическими рисками при подземной разработке месторождений.

Ключевые слова: массив горных пород, динамическая адаптивная геомеханическая модель, шахта, рудник, сейсмособытие, напряженно-деформированное состояние, система шахтного сейсмомониторинга, GITS, CAE Fidesys

Для цитирования: Романевич К.В., Соннов М.А., Мулев С.Н., Долматова Л.В., Рукавишников Г.Д. Разработка динамической адаптивной геомеханической модели массива горных пород с актуализацией по данным шахтной сейсмостанции GITS в CAE Fidesys. *Горная промышленность*. 2026;(3):88–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-88-97>

Development of a dynamic adaptive geomechanical rock mass model with real-time updating based on data from the GITS mine seismic station in CAE Fidesys

K.V. Romanevich¹ ✉, M.A. Sonnov², S.N. Mulev¹, L.V. Dolmatova¹, G.D. Rukavishnikov¹

¹ Saint Petersburg Research Institute for Mining Geomechanics and Surveying, Saint Petersburg, Russian Federation

² Fidesys LLC, Moscow, Russian Federation

✉ romanevichkirill@gmail.com

Abstract: The concept under consideration involves the development of a dynamic adaptive geomechanical model of a rock mass, integrated with the GITS mine seismic monitoring system and implemented within the CAE Fidesys finite element analysis environment. The objective of the study is to create a computational tool capable of quasi-continuous updating of the stress-strain state of the rock mass with account of the progress in mining operations and occurrence of the recorded microseismic events

of varying energy. The proposed approach is based on constructing a three-dimensional finite element model that represents the current geomechanical state of the rock mass, including the configuration of production and development workings, position of the longwall face, and the mining sequence. Unlike previously developed algorithms focused on assessing the impact of individual seismic events, this study aims to establish an integrated computational framework in which the data on coordinates and energy characteristics of events, received from the GITS system, are used for the sequential adjustment of the numerical model. Such adjustments may include modification of the local elastic-strength properties, formation of weakened zones, and stress redistribution in the vicinity of seismic sources. As the result, an iterative model updating procedure is implemented, followed by recalculation of the stress-strain state. This enables generation of an up-to-date distribution of the principal stresses and identification of zones with potential geomechanical hazards. The model is intended to function as a digital twin of the rock mass, capturing its spatial and temporal evolution. An example of practical application of the proposed approach is provided for a coal mine in the Kuzbass region. The study outlines directions for future research aimed at creating a tool for real-time geomechanical risk management in underground mining.

Keywords: rock mass, dynamic adaptive geomechanical model, coal mine, ore mine, seismic event, stress-strain state, mine seismic monitoring system, GITS, CAE Fidesys

For citation: Romanevich K.V., Sonnov M.A., Mulev S.N., Dolmatova L.V., Rukavishnikov G.D. Development of a dynamic adaptive geomechanical rock mass model with real-time updating based on data from the GITS mine seismic station in CAE Fidesys. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):88–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-88-97>

Введение

Подземная разработка рудных и угольных месторождений на современном этапе характеризуется возрастанием геомеханических рисков, обусловленных увеличением глубины ведения очистных работ, интенсификацией отработки запасов и усложнением горно-геологических и горнотехнических условий. Указанные факторы способствуют накоплению высоких уровней напряжений в массиве горных пород и формированию предпосылок к реализации динамических явлений. В соответствии с действующей нормативной базой к основным видам таких явлений относятся горные удары, внезапные выбросы угля (породы) и газа, внезапные выдавливания угля, а также динамические разрушения пород почвы. Статистические данные надзорных органов свидетельствуют о сохранении существенного уровня аварийности, что подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования методов прогноза и предупреждения опасных проявлений горного давления [1; 2].

В настоящее время для обеспечения безопасной выемки угля на пластах, склонных и опасных по горным ударам, применяются геологические, геомеханические и геофизические методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. На их основе реализуются региональный, локальный и текущий прогнозы динамических явлений. Инструментальный контроль остается основным источником информации о фактическом состоянии массива. Особое значение приобретают системы пассивного сейсмического мониторинга, функционирующие в непрерывном дистанционном и автоматизированном режимах и обеспечивающие регистрацию параметров микросейсмической активности.

Однако регистрация параметров сейсмической активности сама по себе не позволяет в полной мере оценить масштаб и характер перераспределения напряжений в массиве. В связи с этим актуальной представляется задача интеграции данных шахтной сейсмостанции с численной геомеханической моделью массива, обеспечивающей количественную оценку перераспределения напряжений с учетом как развития горных работ, так и регистрируемых сейсмособытий.

Реализация подобного подхода предполагает формирование динамической адаптивной модели, функциони-

рующей в едином вычислительном контуре и способной к регулярной актуализации на основе инструментальных данных. Настоящая работа посвящена концептуальной и алгоритмической проработке указанного направления, ориентированного на повышение обоснованности и оперативности геомеханического прогноза при подземной разработке месторождений.

Система сейсмомониторинга в шахтах и рудниках

В соответствии с требованиями нормативных документов по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, региональный прогноз динамических явлений должен осуществляться на основе непрерывных сейсмоакустических наблюдений. Реализация данного вида прогноза обеспечивается применением специализированных систем сейсмомониторинга – шахтных сейсмостанций, представляющих собой программно-технические комплексы, предназначенные для регистрации, сбора, передачи, хранения и анализа информации о сейсмической активности массива горных пород.

Микросейсмический контроль основан на регистрации естественной сейсмической эмиссии массива с использованием сети сейсмопунктов, оснащенных приемно-регистрирующей аппаратурой, средствами телеметрии и вычислительной техникой.

В Российской Федерации разработан и эксплуатируется ряд систем сейсмоакустического мониторинга, различающихся по архитектуре и функциональному назначению [3–8]. Многоуровневые цифровые комплексы ориентированы на повышение отказоустойчивости, защиту от техногенных помех и автоматизированную обработку сигналов. Отдельные решения, реализующие активный принцип, основаны на анализе акустических импульсов, возникающих при работе очистных и проходческих машин, и сопоставлении спектральных характеристик с эталонными записями безопасных участков. Вместе с тем активные системы зависят от наличия технологического воздействия на массив, что ограничивает их применение для непрерывного фоновых контроля.

Особое место среди отечественных разработок занимает система GITS, созданная АО «ВНИМИ» [9].

Структура аппаратного комплекса GITS

Аппаратный комплекс шахтной сейсмостанции GITS представляет собой многоуровневую распределенную систему регистрации и передачи сейсмической информации, включающую совокупность преобразователей, телеметрических модулей, средств защиты и вычислительных устройств, объединенных кабельными линиями связи и локальной вычислительной сетью. Данная геофизическая информационно-передающая система обеспечивает непрерывную регистрацию микросейсмических событий в пределах контролируемого участка шахтного поля. Базовая конфигурация телеметрии поддерживает подключение нескольких трехкомпонентных датчиков с возможностью масштабирования сети и расширения числа каналов регистрации.

В состав аппаратуры нижнего уровня входят сейсмические преобразователи, выносные модули, подземные блоки грозозащиты и линия связи. Данный уровень обеспечивает первичную регистрацию упругих колебаний массива и передачу сигналов на наземную платформу. Аппаратура верхнего уровня включает наземные блоки грозозащиты, базовые модули, платы сопряжения с компьютером, компьютеры слежения и буферного накопления, компьютер обработки и временного хранения, компьютер архивации и связи, а также средства отображения и локальную вычислительную сеть (ЛВС). Такая структура обеспечивает параллельную обработку потоков данных, резервирование функций и долговременное хранение информации.

Подземные выносные модули устанавливаются в горизонтальные скважины, ориентированные по направлению север-юг или запад-восток (рис. 1).

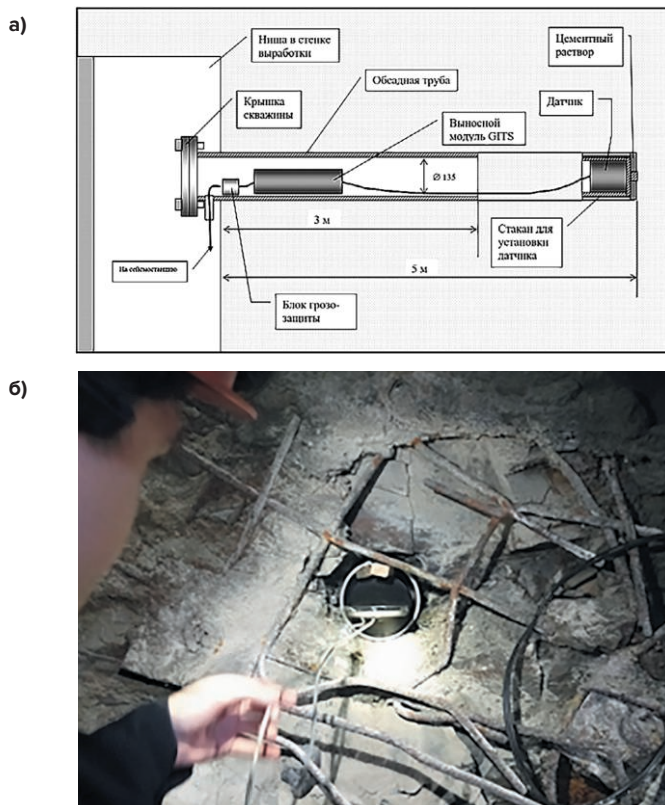


Рис. 1
Наблюдательная скважина подземного сейсмического пункта (а), фото скважины при установке сейсмодатчика (б)

Fig. 1
Observation borehole of an underground seismic station (a), a photograph of the borehole during installation of the seismic sensor (b)

Перед монтажом в забой скважины помещается капсула с цементным раствором, в который фиксируется сейсмический датчик, размещенный в стальном стакане. Конструкция обеспечивает плотный контакт с породным массивом и возможность ориентации датчика по вертикали. Датчик соединяется с выносным модулем посредством экранированного кабеля через герметичные разъемы с соблюдением полярности. Блок грозозащиты электрически соединяется с обсадной трубой, обеспечивая заземление и защиту аппаратуры. В наземных павильонах датчики монтируются в вертикальные скважины с аналогичной схемой подключения и защитой от несанкционированного доступа.

Аппаратура верхнего уровня размещается в здании сейсмической станции. Сигналы по кабельным линиям через наземные блоки грозозащиты поступают в базовые модули, откуда через платы сопряжения передаются на компьютеры первичной регистрации и буферного накопления. Все вычислительные средства объединены ЛВС, обеспечивающей передачу данных на компьютер текущей обработки и далее – на сервер архивации и анализа (рис. 2).

В рабочем режиме сигналы с выносных блоков датчиков через коммутатор входов поступают на регулируемые усилители-фильтры с программно задаваемым коэффициентом усиления в диапазоне 10^3 – 10^5 (шаг 6 dB). После усиления и фильтрации сигналы поочередно преобразуются аналого-цифровым преобразователем в цифровой код и обрабатываются микроконтроллером блока управления. При выходе сигнала за пределы динамического диапазона автоматически корректируется усиление соответствующего канала. Далее формируется импульсно-кодовая последовательность, передаваемая по телеметрической линии в базовый модуль, где осуществляется обратное декодирование и накопление данных. Основной режим эксплуатации рассчитан на длительную автономную работу комплекса с периодическим переходом к режимам тестирования и калибровки для обеспечения метрологической надежности и достоверности регистрируемой информации.

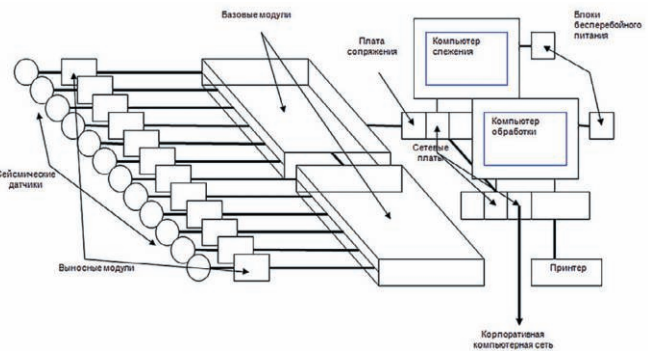


Рис. 2
Схема установки оборудования системы GITS

Fig. 2
Layout of the GITS system components

Функциональные возможности системы GITS и анализ данных

Системы, реализующие подходы шахтной сейсмостанции GITS, функционируют на следующих объектах. Шахты «Антоновская», «Ерунаковская», «Распадская-Коксовая», «Осинниковская», «Усковская», «Алардинская», «Есаульская», «Полысаевская», «Чертинская-Коксовая», «Большевик», «Увальная», «Заполярная», «Денисовская», «Воркутин-

ская», «Комсомольская», «Воргашорская», «Баренцбург», рудники «Магnezит», Таштагольский, Шерегешский, Казский, Учалинский, Интернациональный, рудники Норильска (Октябрьский, Комсомольский, Таймырский, Скалистый), и Северомуйский железнодорожный тоннель.

Базовая задача системы сейсмомониторинга заключается в регистрации сейсмических событий, определении координат их очагов и расчете выделенной энергии, а также контроле и прогнозировании формирования зон, в которых возможны опасные геодинамические явления. По системам GITS предварительная обработка сейсмособытий выполняется службой сменных квалифицированных операторов Центра геодинамического мониторинга ВНИМИ в круглосуточном режиме на основе анализа сейсмограмм.

В предварительную обработку оператором включены следующие этапы:

- определение временных границ события для каждого канала, на сейсмограмме которого визуально фиксируются моменты начала и окончания события (первое вступление и окончание);
- расчет энергии события, который осуществляется автоматически после задания временных границ;
- определение координат гипоцентра события с использованием ряда алгоритмов и их комбинаций и запись полученных данных в соответствующую базу данных.

Начиная с января 1993 г. по настоящее время во ВНИМИ ведутся исследования по поиску прогностических критериев подготовки сильных динамических явлений (критерии удароопасности) для условий глубоких рудников Норильского комбината и на других шахтах и рудниках России.

Основными параметрами, по которым проводился анализ, являются следующие:

1. Уровень сейсмической активности – число динамических явлений, происходящих за определенный промежуток времени в фиксированном объеме массива горных пород.
2. Уровень сейсмической энергии – количество выделенной энергии за определенный промежуток времени в фиксированном объеме массива горных пород.
3. Константы закона повторяемости, которые отражают связь количества динамических явлений с величиной их сейсмической энергии.
4. Максимальный энергетический класс происходящего сейсмического события с энергией E , измеренной в джоулях.
5. Пространственно-временное распределение зон сейсмической активности.
6. Изменение максимальной плотности сейсмических событий во времени.
7. Градиент нарастания количества сейсмических событий.
8. Градиент нарастания суммарной энергии, а также некоторые другие параметры.

Непрерывное совершенствование системы GITS сопровождается разработкой и внедрением нового функционала, направленного на повышение достоверности и оперативности прогноза динамических явлений [10].

В настоящее время программные модули GITS позволяют привязывать возникающие события к горизонтальным планам и к трехмерному пространству шахты. Модуль для просмотра и анализа событий позволяет выгружать из баз данных информацию о событиях за требуемый период

времени и осуществлять анализ этой информации с помощью следующих функций:

- визуализация положения гипоцентров событий на горизонтальных и вертикальных планах шахты (рудника или карьера);
- визуальная идентификация событий на карте с помощью цветовой дифференциации по энергии, а также по давности события;
- отображение области действия события (радиусы влияния);
- выборка и анализ событий только в определенном пространственном объеме;
- выборка и анализ событий только с энергией в определенном диапазоне;
- просмотр графиков статистик – количества событий и их энергии в определенный период времени;
- измерение углов и расстояний;
- отображение самого нового события из представленных на карте;
- классификация различных типов сейсмических событий с использованием алгоритмов машинного обучения;
- генерация карт сейсмической активности по различным критериям с настраиваемыми параметрами и др.

Центр геодинамического мониторинга ВНИМИ обеспечивает круглосуточную регистрацию микросейсмической активности, определение координат и энергетических характеристик очагов сейсмособытий, формирование карт сейсмической активности и выделение потенциально удароопасных зон на контролируемых объектах (рис. 3).

Реализация единой методологии обработки и интерпретации данных позволяет сопоставлять параметры сейсмичности в различных горно-геологических условиях и формировать обоснованные критерии оценки геодинамической обстановки.

Внедрение разработанных алгоритмов в составе системы GITS на основе высокоточных данных сейсмического мониторинга, обеспечивающих детализированное пространственно-временное описание состояния массива горных пород, формирует технологическую основу для создания цифрового двойника шахты и вмещающего массива.

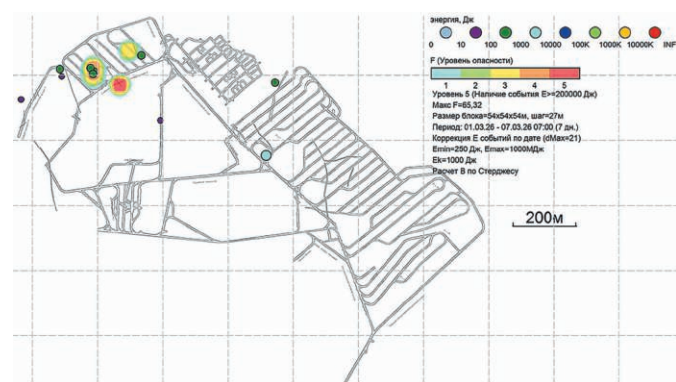


Рис. 3
Пример ежесуточно обновляемой карты сейсмической активности, совмещенной с планом горных работ рудника. Точками показаны единичные сейсмические события за одни сутки, цветом показана рассчитанная зона сейсмической активности по методике ВНИМИ

Fig. 3
An example of a daily updated map of seismic activity superimposed on the plan of underground mining operations. The dots indicate individual seismic events recorded over a 24-hour period, while the colour indicates the calculated zone of seismic activity using the VNIIMI methodology

Учет сейсмособытий в геомеханической модели

Очаг сейсмособытия моделируется зоной деформаций массива, которая может быть охарактеризована объемом разрушенного материала, и чем больше энергия в очаге, тем больше размер этой зоны [11].

В научных публикациях представлены различные эмпирические соотношения, устанавливающие связь между энергетической характеристикой сейсмического события и объемом его очаговой области. Так, согласно работе [12] зависимость между энергией E и объемом очага V описывается выражением:

$$E = 0,27 \cdot (10^{-2}) \cdot (V^{1,8}). \quad (1)$$

Данное соотношение отражает существенно нелинейный характер связи: при увеличении объема очага энергия возрастает быстрее пропорциональной зависимости, что соответствует усилению энерговыделения по мере роста размеров зоны разрушения.

В работе [13] предложена иная интерпретация зависимости:

$$E = 10^2 \cdot V. \quad (2)$$

В этом случае реализована линейная модель, предполагающая прямую пропорциональность между энергией и объемом очага. Подобный подход носит упрощенный характер и может использоваться в ограниченных условиях, когда влияние сложных геомеханических факторов не является определяющим.

В работе [14] на основании экспериментальных исследований землетрясений и подземных взрывов показано, что взаимосвязь плотности сейсмической энергии E_c и объема источников упругих волн V_c удовлетворительно описывается соотношением:

$$\lg E_c = \lg V_c + 3. \quad (3)$$

В работах [15; 16] для оценки объема зоны разрушения V , м³, при горном ударе с энергией E , Дж, предлагается использовать соответствующую расчетную формулу, позволяющую перейти от энергетической характеристики события к геометрическим параметрам сформированной области разрушения:

$$V = 3 \cdot 10^{-2} \cdot E. \quad (4)$$

В работе [11] рассмотрены различные формы очага (близкая сфере, эллипсу, плоскости, линии и т.п.). Для оценки размера очага при различных его формах используют эмпирические формулы:

$$r = 1,85 \cdot E_c^{0,186}, \text{ м (сфера);} \quad (5)$$

$$L = 2,9 \cdot E_c^{0,24}, \text{ м (плоскость);} \quad (6)$$

$$W = 2,0 \cdot E_c^{0,24}, \text{ м (плоскость),} \quad (7)$$

где E_c – сейсмическая энергия события; r – радиус сферы, охватывающий зону неупругих деформаций; L – длина разрыва; W – ширина разрыва.

В работе [11] также выполнено определение области влияния микросейсмического события заданной энергии и геометрии на массив горных пород в плоской постановке с использованием CAE Fidesys [17]. В результате численного моделирования установлено, что характер и величина отклонений главных напряжений определяются объемом очага, его пространственным положением относитель-

но горной выработки, а также степенью снижения упруго-прочностных характеристик массива в зоне динамического возмущения. Полученные результаты позволили выявить качественные закономерности формирования зоны перераспределения напряжений.

В работе [18] исследования были развиты в объемной постановке. В CAE Fidesys были выполнены расчеты по оценке влияния локализованных сейсмособытий на напряженно-деформированное состояние массива вокруг горной выработки. Параметры очага варьировались по энергии, положению и степени разупрочнения, что позволило оценить чувствительность НДС к изменениям характеристик источника. Показано, что даже при локальном характере события возникает перераспределение напряжений в зоне взаимодействия очага и выработки. Кроме того, был предложен алгоритмический подход к учету параметров отдельных сейсмособытий в конечно-элементной модели на основе данных системы GITS, подтвердивший принципиальную возможность интеграции результатов мониторинга в расчетную геомеханическую схему.

В настоящем исследовании реализован иной подход. Серия сейсмособытий, зарегистрированных в течение ограниченного временного интервала и пространственно-сгруппированных, объединяется в единую расчетную плоскость, интерпретируемую как зона разуплотнения или формирующееся нарушение. В численной модели рассматривается массив горных пород с системой выработок и введенной ослабленной плоскостью (сейсмоплоскостью), параметры которой задаются по данным о концентрации событий. В численной модели рассматривается массив горных пород с системой выработок и введенной ослабленной плоскостью, параметры которой задаются по данным о концентрации событий. Такой подход позволяет оценить совокупное влияние группы событий на НДС массива.

Пример практической апробации подхода при анализе аварийной ситуации на шахте

Практическая реализация предложенного алгоритма интеграции данных сейсмомониторинга и численной геомеханической модели была выполнена для одной из угольных шахт в юго-восточной части Кузнецкого бассейна, где имела место аварийная ситуация, сопровождавшаяся интенсивными динамическими проявлениями горного давления.

Ведение горных работ на момент происшествия осуществлялось в соответствии с проектной документацией по отработке запасов системой разработки наклонными слоями с выемкой слоев длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли.

Рассматриваемый угольный пласт каменноугольного месторождения отнесен к следующим категориям по динамическим явлениям:

- к угрожаемым по горным ударам с глубины 150 м;
 - к угрожаемым по внезапным выбросам угля и газа с глубины 300 м;
 - к не угрожаемым по внезапному выдавливанию угля.
- Вмещающие горные породы пласта отнесены к следующим категориям по динамическим явлениям:
- к не угрожаемым по динамическому разрушению пород почвы;
 - к не склонным к внезапным выбросам породы и газа с глубины 600 м;
 - к склонным к горным ударам с глубины более 500 м.

Шахта отнесена по газу метану к сверхкатегорийной.

Мощность рассматриваемого угольного пласта составляет 10,03 – 10,78 м. Углы падения пласта – 6–13°. Коэффициент крепости угля по шкале Протодяконова – 0,90–1,50, коэффициент крепости породных прослоек – 1,5–2,9, сопротивление резанию угля – 209 кгс/см (сопротивление резанию породных прослоек – 300 кгс/см), объемный вес угля – 1,31 т/м³ (объемный вес горной массы – 1,36 т/м³), коэффициент разрыхления – 1,25–1,45, пористость – 3,5–8,1%, техническая марка угля – К.

Непосредственная кровля пласта представлена средне-крупнозернистым слоистым алевролитом, мощностью 7,0–10,0 м. Породы непосредственной кровли имеют коэффициент крепости $f = 5-7$, средний предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 32-71$ МПа.

Породы основной кровли имеют коэффициент крепости $f = 8-10$, предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 90-110$ МПа.

Вентиляционный штрек, в котором произошла авария, находился на глубине ведения работ 430–465 м от дневной поверхности. По трассе выработки картируется пересечение с опасной зоной геологического нарушения типа «надвиг». Кровля выработки относится к III типу пород кровли по обрушаемости. Непосредственная кровля относится к I классу «Обрушается почти непосредственно за выемкой угля».

В июле 2022 г. произошло разрушение вентиляционного штрека вследствие природного землетрясения с источником вне шахтного поля. Точные координаты землетрясения рассчитать невозможно, так как очаг события располагался вне сейсмической сети шахты. Направление, откуда пришло событие, совпадало с направлением двух промышленных взрывов, зафиксированных перед землетрясением. После землетрясения увеличения сейсмической активности шахты не наблюдалось.

До аварии в течение периода 2021–2022 гг. в шахте системой GITS не фиксировалось опасных ситуаций в районе вентиляционного штрека – отсутствовали зоны удароопасности и сейсмические события свыше 5000 Дж. Однако, ретроспективный анализ сейсмических событий показывает, что, начиная с января 2020 г. по март 2020 г. на проекции одного из разрезов массива (YZ) прослеживается выстраивание сейсмических событий в линию вблизи «надвига» (рис. 4).

По результатам последующего анализа установлено, что развитию аварии предшествовал этап накопления сейсмических событий в локальной зоне массива, приуроченной к области тектонического нарушения. Система сейсмодиторинга GITS зафиксировала последовательную активизацию очагов, пространственно-сгруппированных вблизи предполагаемого разлома либо зоны формирования нового разрыва породного массива.

Анализ временной и энергетической структуры зарегистрированных событий показал нарастание суммарной выделенной энергии и тенденцию к пространственной миграции очагов вдоль протяженной ослабленной зоны. В рамках предлагаемого подхода данные о координатах гипоцентров и энергетических характеристиках были использованы для поэтапной корректировки расчетной конечно-элементной модели участка шахтного поля с учетом локального разупрочнения массива в пределах формирующейся зоны динамического возмущения (рис. 5).

В ходе расчетов в CAE Fidesys были получены поля распределений максимальных и минимальных главных

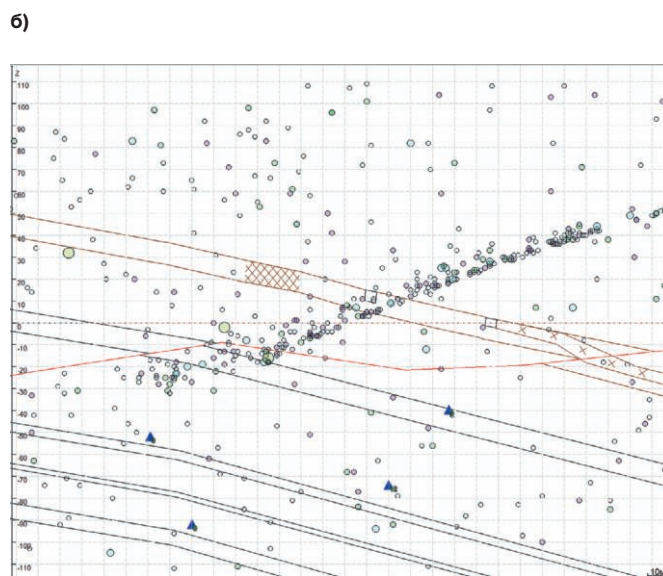
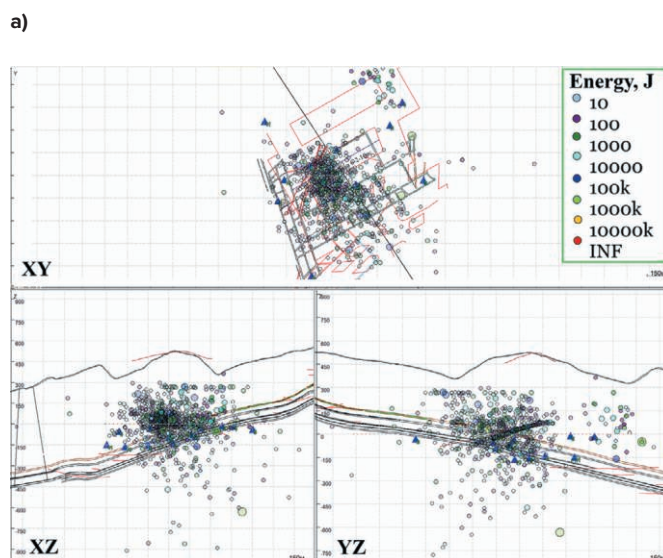


Рис. 4
Разрез угольной шахты по осям XYZ с облаком зарегистрированных сейсмических событий (а) и увеличенная проекция YZ (б) за период с февраля по сентябрь 2020 г..
Окна программы GITS

Fig. 4
Screens of the GITS software suite showing a cross-section of a coal mine along the XYZ axes with a cloud of recorded seismic events (a) and an magnified YZ projection (b) for the period from February to September 2020

напряжений (рис. 6, а, в). Далее в расчет была добавлена область, соответствующая скоплению сейсмических событий по данным сейсмостанции GITS. Физико-механические свойства этой области были искусственно ослаблены по сравнению с вмещающим массивом (рис. 6, б, з).

После расчета распределения главных напряжений был рассчитан коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) по критерию Кулона–Мора, который учитывает действие как сжимающих, так и растягивающих напряжений в каждой точке расчетной области.

Коэффициент запаса устойчивости в каждой точке сплошного массива определялся по уравнению:

$$K_y = \frac{2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi}{(\sigma_1 - \sigma_3)}, \quad (8)$$

где C – сцепление, МПа; φ – угол внутреннего трения, град; σ_1 и σ_3 – соответственно главные максимальные и минимальные напряжения, действующие в массиве пород, МПа.

Результаты расчета КЗУ представлены на рис. 7. Значения $K_y < 1$ характеризуют области запредельного деформирования и потенциального разрушения породного массива.

Обсуждение результатов

Картина распределения минимальных главных напряжений (см. рис. 6, а, б) демонстрирует увеличение области действия растягивающих напряжений до 8 МПа в кровле выработок в случае появления сейсмоплоскости. Также наблюдаются зоны растягивающих напряжений в местах, где сейсмоплоскость пересекает угольный пласт и тектоническое нарушение.

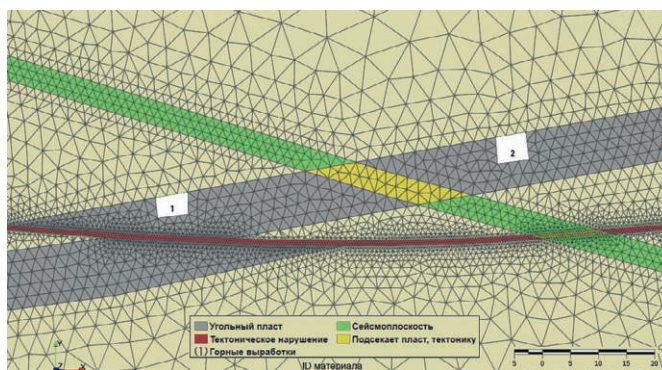


Рис. 5
 Конечно-элементная модель, построена в CAE Fidesys

Fig. 5
 A finite element model created in CAE Fidesys

Распределение максимальных главных напряжений (см. рис. 6, в, г) в случае появления сейсмоплоскости показывает рост сжимающих напряжений в бортах выработок. Значения напряжений в этих местах достигают

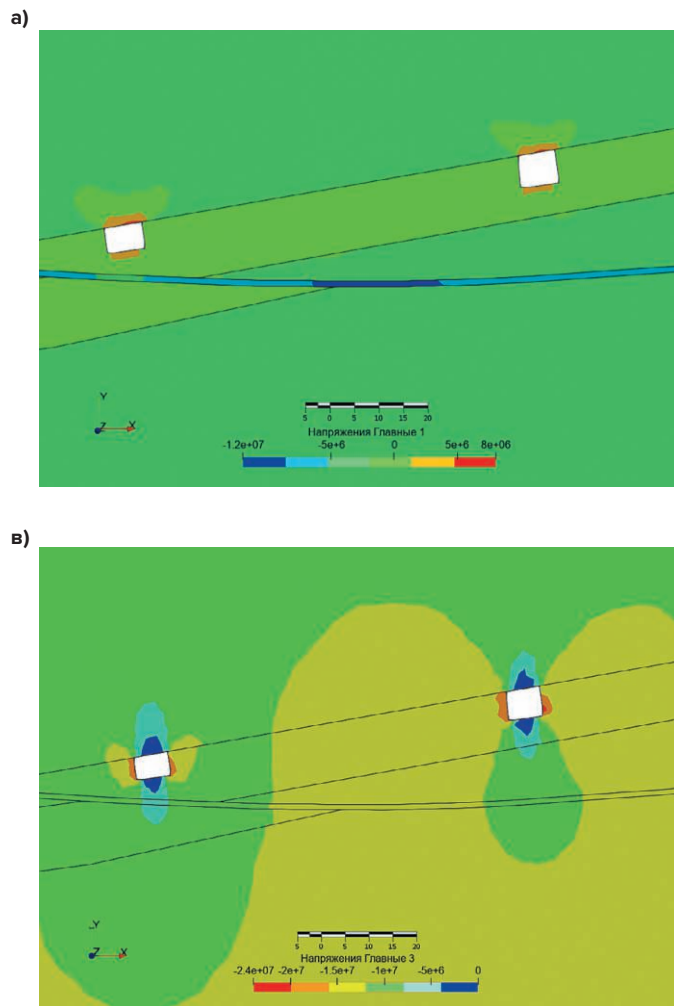


Рис. 6
 Результаты расчета напряженно-деформированного состояния: а – минимальные главные напряжения без сейсмоплоскости; б – минимальные главные напряжения с учетом сейсмоплоскости; в – максимальные главные напряжения без сейсмоплоскости; г – максимальные главные напряжения с учетом сейсмоплоскости. Снижение прочностных характеристик в пределах сейсмоплоскости – в 10 раз

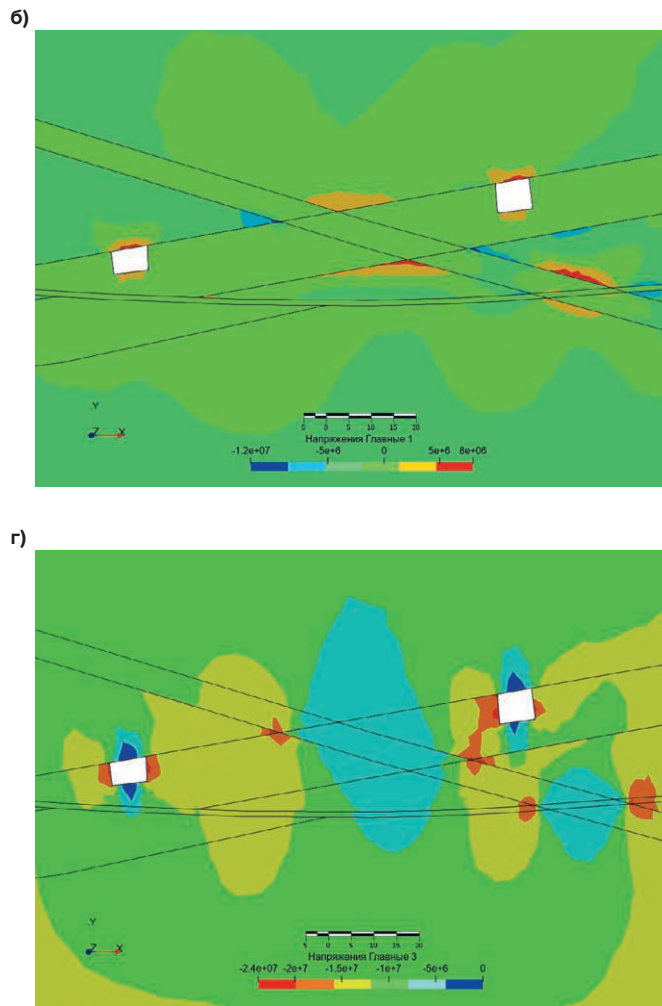


Fig. 6
 Results calculating the stress-strain state: а – minimum principal stresses without the seismic plane; б – minimum principal stresses with account of the seismic plane; в – maximum principal stresses without the seismic plane; г – maximum principal stresses with account of the seismic plane. A tenfold reduction in the strength characteristics within the seismic plane

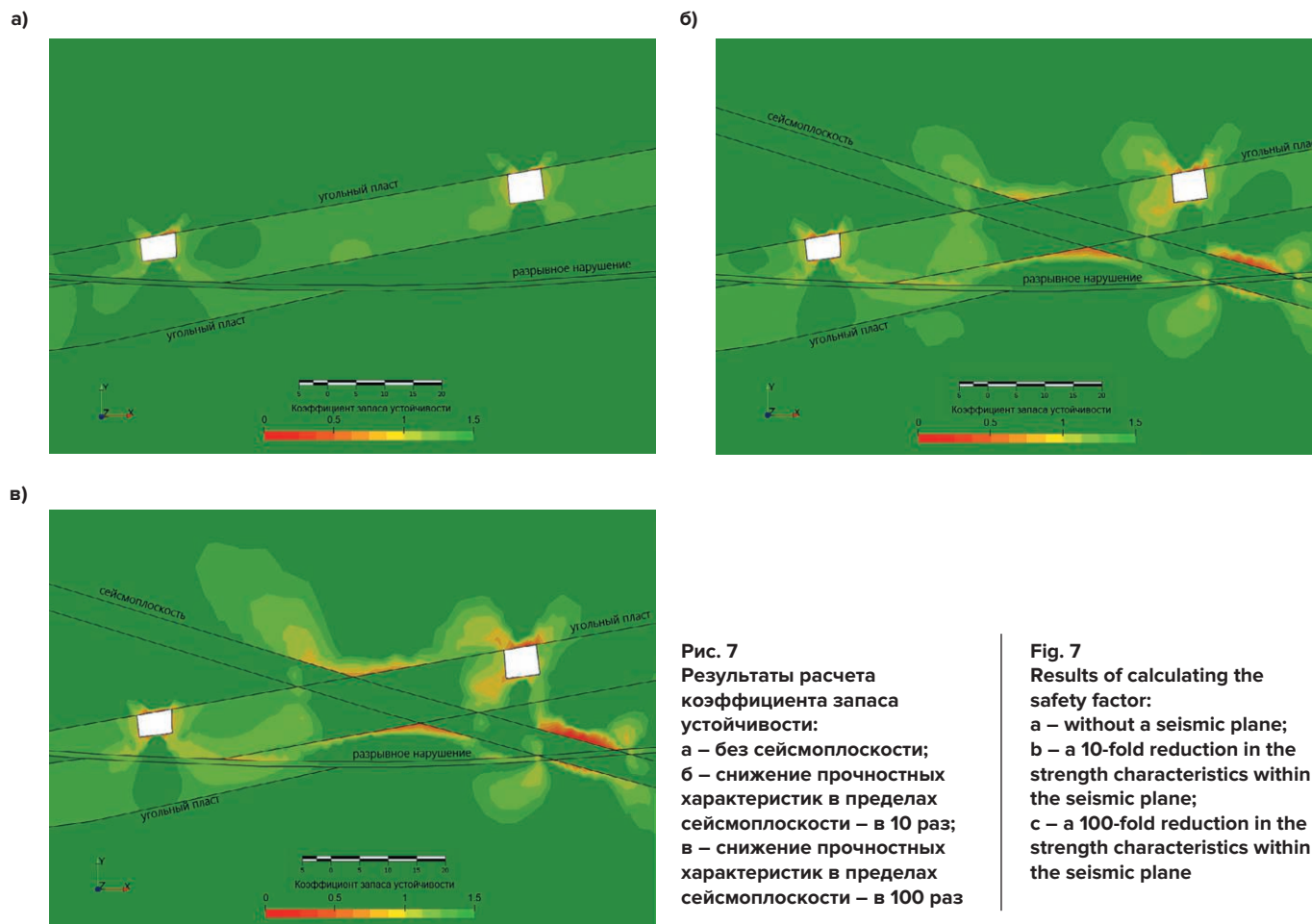


Рис. 7
Результаты расчета коэффициента запаса устойчивости:
а – без сейсмоплоскости;
б – снижение прочностных характеристик в пределах сейсмоплоскости – в 10 раз;
в – снижение прочностных характеристик в пределах сейсмоплоскости – в 100 раз

Fig. 7
Results of calculating the safety factor:
a – without a seismic plane;
b – a 10-fold reduction in the strength characteristics within the seismic plane;
c – a 100-fold reduction in the strength characteristics within the seismic plane

25 МПа, что сопоставимо с пределом прочности пород на сжатие.

Наличие ослабленной зоны сейсмических событий привело к смещению участков максимального сжатия в сторону почвы выработок, что подтверждается фактическим пучением почвы.

По картине распределения коэффициента запаса устойчивости видно, что ослабление массива в виде появления сейсмоплоскости существенно увеличивает области породного массива, находящиеся на стадии запредельного деформирования. Обширные участки массива с $K_y < 1$ наблюдаются в почве и бортах выработок, а также вдоль ослабленной сейсмоплоскости, включая зоны, в которых фактически имело место разрушение вентиляционного штрека.

Заключение

На текущем этапе реализованы и апробированы отдельные элементы концепции динамической адаптивной модели, их отработка осуществляется в существенно упрощенной постановке – как с точки зрения геометрии расчетной области, так и в части физико-механических свойств массива и граничных условий. Используемые в настоящее время схемы носят итерационный характер и применяются к обобщенной геомеханической модели шахтного поля без детализированного учета всей сложности горно-геологических условий и технологической динамики выемочных работ. Полномасштабная реализация алгоритма в режиме, близком к реальному времени, с автоматической интеграцией данных мониторинга и непре-

рвной актуализацией пространственно-распределенной модели НДС пока находится в стадии методической и программной проработки.

В целом выполненное исследование демонстрирует принципиальную возможность и высокую эффективность интеграции данных сейсмического мониторинга (GITS) в процессы численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород с использованием современных САЕ-систем (в частности, CAE Fidesys). Предложенный подход обеспечивает переход от статического анализа к динамически обновляемой геомеханической модели, учитывающей фактическое развитие геодинамической активности.

Сопоставление результатов прогнозного моделирования с фактическими данными о нарушениях в горной выработке и вмещающем массиве подтверждает возможность верификации и калибровки модели. При этом выявлена перспективность использования расчетных данных не только для оценки устойчивости, но и для прогноза вторичных сейсмических проявлений (горных ударов, толчков и иных форм горного давления), что создает основу для формирования замкнутого цикла «мониторинг-моделирование-прогноз-проверка».

Таким образом, интеграция данных сейсмомониторинга с численным моделированием НДС формирует научно обоснованный инструмент оперативного управления геомеханическим состоянием массива, позволяющий повысить безопасность ведения горных работ, снизить вероятность аварийных ситуаций и оптимизировать планирование горнотехнических мероприятий.

Список литературы / References

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):85–92. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.085>
Lomov M.A. Accidents in the mining industry in Russia that occurred as a result of dynamic manifestations in the mountain range. Control of mountain pressure at the Yuzhnoye field (Primorsky krai). *Problems of Subsoil Use*. 2023;(1):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.085>
2. Федянин А.С., Еременко В.А. Вероятностно-статистический подход к прогнозированию аварий в подземных горных выработках. *Горный журнал*. 2026;(1):17–22. <https://doi.org/10.17580/gzh.2026.01.02>
Fedyanin A.S., Eremenko V.A. Probabilistic and statistical approach to accident forecasting in underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2026;(1):17–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2026.01.02>
3. Романевич К.В., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д. Применение горно-шахтной системы сейсмического контроля GITS для целей геотехнического мониторинга подземных сооружений. В кн.: *Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: материалы Общерос. науч.-практ. конф., г. Москва, 22 марта 2024 г.* М.: ООО «Геомаркетинг»; 2024. С. 44–51.
4. Константинов А.В., Грунин А.П., Сидляр А.В., Ломов М.А. Совершенствование программно-аналитических средств системы сейсмоакустического мониторинга удароопасности «PROGNOZ-ADS». В кн.: *Цифровые технологии в горном деле: тезисы докл. Всерос. науч.-техн. конф., г. Апатиты, 13–16 июня 2023 г.* Апатиты: Кольский научный центр РАН; 2023. С. 26.
5. Бутырин П.Г. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития. *Российский сейсмологический журнал*. 2021;3(3):84–94. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06>
Butyrin P.G. Digital seismic logger “Ermak-5”. Five years of development. *Russian Journal of Seismology*. 2021;3(3):84–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06>
6. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S7):574–583.
Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I. Acoustic monitoring of the condition of rock mass and forecast of dynamic phenomena. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S7):574–583. (In Russ.)
7. Кубрин С.С., Журавлев Е.И. Контроль геодинамического и газодинамического состояния массива горных пород. В кн.: *Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 6 апреля – 7 июня 2016 г.* Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; 2016. С. 19–25.
8. Патрушев Ю.В., Шнайдер И.В. Обзор методов и технологий сейсмических систем контроля состояния устойчивости горного массива в подземных условиях. В кн.: *Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 6 апреля – 7 июня 2016 г.* Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; 2016. С. 65–70.
9. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры АНГЕЛ-М в угольной и рудной промышленности. *Уголь*. 2014;(10):14–19.
Yakovlev D.V., Mulyov S.N. Experience of ANGEL-M multipurpose geophysical equipment use in coal industry and ore mining. *Ugol'*. 2014;(10):14–19. (In Russ.)
10. Разумов Е.Е. Совершенствование метода прогнозирования удароопасности по результатам сейсмического мониторинга при интенсивной отработке угольных пластов [дис. ... канд. техн. наук]. Кемерово; 2025. 130 с.
11. 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. В кн.: *Новые идеи в науках о Земле: материалы 17-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 3–4 апреля 2025 г.* М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе; 2025. Т. 1. С. 152–156.
12. Ломакин В.С., Григорович С.В., Потехин Р.П., Халевин Н.И. О связи объема очаговой зоны разрушения с сейсмической энергией горного удара. *Геология и геофизика*. 1989;30(5):129–132.
Lomakin V.S., Grigorovich S.V., Potekhin R.P., Khalevin N.I. About the connection between the volume of destruction focal zone and seismic energy of mountain shock. *Geologiya i Geofizika*. 1989;30(5):129–132. (In Russ.)
13. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема сейсмического очага. *Доклады Академии наук СССР*. 1983;271(3):598–602. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/rus/dan46200> (дата обращения: 02.03.2026).
Sadovskii M.A., Pisarenko V.F., Steinberg V.V. On the dependence of earthquake energy on the seismic focus volume. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1983;271(3):598–602. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/rus/dan46200> (accessed: 02.03.2026).
14. Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах. *Доклады Академии наук СССР*. 1985;283(5):1153–1156. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/rus/dan47142> (дата обращения: 02.03.2026).
Sadovskii M.A., Kedrov O.K., Pasechnik I.P. On the seismic energy and volume of foci at crustal earthquakes and underground explosions. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1985;283(5):1153–1156. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/rus/dan47142> (accessed: 02.03.2026).

15. Карпенко В.В., Огородников Ю.Н. Параметры прямых продольных и поперечных сейсмических волн при горных ударах в скальных породах. *Записки Горного института*. 2007;172:14–17. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7610> (дата обращения: 02.03.2026).
Karpenko V.V., Ogorodnikov Y.N. Parameters of direct longitudinal and transverse seismic waves of upland shocks in rocky rocks. *Journal of Mining Institute*. 2007;172:14–17. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7610> (accessed: 02.03.2026).
16. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И. К вопросу о классификации горных ударов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1986;(5):3–11.
Shemyakin, E.I., Kurlenya, M.V., Kulakov, G.I. On the classification of rockbursts. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1986;(5):3–11. (In Russ.)
17. Козырев А.А., Земцовский А.В., Кулькова М.С., Соннов М.А. Опыт применения САЕ Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения. *Горная промышленность*. 2021;(6):94–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-94-98>
Kozyrev A.A., Zemtsovskiy A.V., Kulkova M.S., Sonnov M.A. Experience of CAE Fidesys application in numerical geomechanical modelling of Zhdanovskoe deposit. *Russian Mining Industry*. 2021;(6):94–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-94-98>
18. Романевич К.В., Мороз Н.Е., Иванов Д.А. Моделирование влияния сейсмических событий на напряженно-деформированное состояние массива горных пород при подземной разработке месторождений. *Проблемы недропользования*. 2025;(2):69–79. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.02.069>
Romanevich K.V., Moroz N.E., Ivanov D.A. Modeling the impact of seismic events on the stress-strain state of a rock mass during mining operations. *Problems of Subsoil Use*. 2025;(2):69–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.02.069>

Информация об авторах

Романевич Кирилл Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований, ученый секретарь института, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-2052-7816>; e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Соннов Максим Александрович – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора, ООО «ФИДЕСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0004-3932-5571>, e-mail: sonnov@cae-fidesys.com

Мулёв Сергей Николаевич – член корреспондент Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ), заместитель генерального директора по науке, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6745-5291>; e-mail: smuleva@yandex.ru

Долматова Лилиана Вадимовна – ведущий инженер-геомеханик, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0000-7510-0039>, e-mail: gabitova.liliana@yandex.ru

Рукавишников Георгий Дмитриевич – руководитель центра геодинамического мониторинга, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8228-2870>; e-mail: geodmiruk@gmail.com

Information about the authors

Kirill V. Romanevich – Cand. Sci. (Econ.), Leading Research Associate, Laboratory of Geophysical Research, Academic Secretary, Saint Petersburg Research Institute for Mining Geomechanics and Surveying, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-2052-7816>; e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Maksim A. Sonnov – Full Member of the Academy of Mining Sciences, Deputy General Director, Fidesys LLC, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-3932-5571>; e-mail: sonnov@cae-fidesys.com

Sergey N. Mulev – Corresponding Member of the International Academy of Ecology and Life Protection Sciences, R&D Director, Saint Petersburg Research Institute for Mining Geomechanics and Surveying, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6745-5291>; e-mail: smuleva@yandex.ru

Liliana V. Dolmatova – Senior Rock Mechanics Engineer, Saint Petersburg Research Institute for Mining Geomechanics and Surveying, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0000-7510-0039>, e-mail: gabitova.liliana@yandex.ru

Georgy D. Rukavishnikov – Head of the Centre for Geodynamic Monitoring, Saint Petersburg Research Institute for Mining Geomechanics and Surveying, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8228-2870>; e-mail: geodmiruk@gmail.com

Article info

Received: 26.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 15.04.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 26.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 15.04.2026