УДК 622.83:550.34.016

Романевич Кирилл Викторович

ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела — межотраслевой научный центр «ВНИМИ», 199106, г. Санкт-Петербург, 22-я линия ВО, д.3, корп.1; Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54 e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Мороз Никита Евгеньевич

научный сотрудник, лаборатория геофизических исследований, Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела — межотраслевой научный центр «ВНИМИ»,

Иванов Дмитрий Алексеевич инженер.

лаборатория геофизических исследований, Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела межотраслевой научный центр «ВНИМИ»,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМОСОБЫТИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

Аннотация:

Целью настоящей работы является разработка алгоритма оценки влияния сейсмособытий на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в процессе ведения горных работ. Работа алгоритма заключается в расчете исходной геомеханической модели массива горных пород, которая описывает начальное НДС массива. При возникновении сейсмического события в массиве система сейсмического мониторинга фиксирует его координаты и энергию. На основе этих данных с учетом воздействия события на массив выполняется корректировка геомеханической модели в соответствии с разработанной процедурой. После корректировки производится расчет обновленного НДС массива, что позволяет перейти к актуализированной геомеханической модели. По этой схеме осуществляется непрерывная оценка риска возникновения опасных проявлений горного давления, что обеспечивает прогнозирование и предотвращение потенциальных аварийных ситуаций.

В настоящей статье описан способ учета влияния сейсмического события на НДС породного массива вблизи горной выработки. Проведено моделирование параметров очага сейсмособытия и моделирование массива горных пород с выработкой. Проведенный анализ результатов моделирования и расчета показывает, что максимальные отклонения главных напряжений (оЗ) в массиве горных пород зависят от объема очага сейсмособытия, его расположения относительно

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.069

Romanevich Kirill V.

Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center «VNIMI», St. Petersburg; Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk

e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Moroz Nikita E.

Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center «VNIMI»,

Ivanov Dmitry A.

Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center «VNIMI»,

MODELING THE IMPACT OF SEISMIC EVENTS ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A ROCK MASS DURING MINING OPERATIONS

Abstract:

In several mines in Russia, a seismic activity catalog is being compiled using the GITS seismic monitoring system, which continuously records seismic events and calculates their focal coordinates and energy. Underground mining operations can generate dozens to hundreds of seismic events of varying energy per day.

This study aims to develop an algorithm for assessing the impact of seismic events on the stress-strain state (SSS) of rock masses during mining. The algorithm first calculates an initial geomechanical model describing the rock mass's SSS. When a seismic event occurs, the system records its coordinates and energy, updating the geomechanical model accordingly. This adjustment enables continuous risk assessment of hazardous rock pressure manifestations, aiding in accident prevention.

This article describes a method for taking into account the influence of a seismic event on the stress-strain state of a rock mass near a mine working. The parameters of the seismic event source and the rock mass with a working were modeled. The analysis of the modeling and calculation results shows that the maximum deviations of the main stresses (σ 3) in the rock mass depend on the volume of the seismic event source, its location relative to the working (sideways or from above) and the level of reduction in the elastic-strength properties of the massif during modeling; the degree of these dependencies must be further clarified.

The study outlines future research directions, empha-

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, https://rscf.ru/project/23-17-00148/.

выработки (сбоку или сверху) и уровня снижения упруго-прочностных свойств массива при моделировании, степень этих зависимостей необходимо уточнить дополнительно.

В статье определены перспективные направления дальнейших исследований, подчеркивается, что развитие данного подхода позволит повысить эффективность управления геомеханическими рисками при подземной разработке месторождений.

Ключевые слова: массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, сейсмособытие, сейсмомониторинг, численное моделирование, GITS, Fidesys. sizing that this approach can improve geomechanical risk management in underground mining.

Key words: rock mass, stress-strain state, seismic event, seismic monitoring, numerical modeling, GITS, Fidesys.

Введение

Поле напряжений массива горных пород, имеющего блочное строение, является неоднородным. Исследованиями напряженно-деформированного состояния (НДС) тектонически нарушенных массивов устанавливается, что в отдельных блоках существует повышенный или пониженный уровень напряжений, ряд блоков характеризуется наличием зон повышенной концентрации напряжений, где возможны опасные проявления горного давления в пределах горных выработок.

При увеличении глубин горных работ и объемов выработанных пространств отмечается осложнение геомеханической и геодинамической обстановки, в ряде случаев возрастает сейсмическая активность массива. В свою очередь проводимые технологические взрывы и возникающие в массиве природные сейсмические события (толчки, микроудары и др.) оказывают влияние на перераспределение НДС породного массива: под их воздействием может происходить как разгрузка массива, так и, наоборот, рост напряжений на некоторых участках. Перечисленные факторы увеличивают риск возникновения опасных проявлений горного давления и различных форм разрушения горных выработок.

В рамках научно-исследовательских работ различных коллективов разрабатываются комплексные критерии удароопасности для отдельных участков массива горных пород, в том числе путем оценки НДС массива (численное моделирование НДС) по долгосрочным данным сейсмомониторинга [1, 2].

Так, в работе [1] «представлены результаты исследования изменений сейсмичности массива горных пород за восьмилетний период мониторинга на участке месторождения со сложными горно-геологическими условиями при развитии горных работ, которые проводятся одновременно на нескольких горизонтах, а также проведено сопоставление сейсмических данных с расчетными характеристиками действующего поля напряжений» — активизация сейсмичности характеризуется как отражение процесса перераспределения напряжений, происходящего под влиянием горных работ. Вместе с тем отмечается, что зачастую высокий уровень сейсмичности не оказывает влияния на устойчивое состояние массива, что вызывает определенные сложности при прогнозе удароопасности. Кроме того, такой подход позволяет выполнять оценку возможного изменения НДС в среднесрочной и долгосрочной постановке, т.к. для анализа необходима аккумуляция представительной статистики по произошедшим сейсмособытиям.

Целью данной работы является разработка алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ. На первом этапе данного исследования были поставлены следующие задачи:

- создание модели участка массива;
- моделирование параметров очага сейсмособытия;
- оценка изменения НДС участка массива по результатам численного моделирования в зависимости от параметров сейсмособытий.

Регистрация сейсмических событий в массиве горных пород

Шахтная сейсмология изучает процессы упругой и пластической деформации горных пород, вызванные горными выработками. Упругая деформация характеризуется перемещением существующих микродефектов без их увеличения, тогда как пластическая деформация связана с разрушением и трением при скольжении, что приводит к катакластическому течению и излучению сейсмических волн. Амплитуда и частота этих волн зависят от прочности породы, уровня напряжений, размера источника и скорости деформации [3, 4].

Сейсмическое событие любой энергии представляет собой процесс перехода энергии упругих деформаций породного массива в кинетическую энергию колебаний. Как следствие, НДС в области очага должно измениться. При этом сама очаговая область разгружается от напряжений, а окружающий ее массив будет испытывать пригрузку вследствие перераспределения напряжений.

В соответствии с требованиями нормативной документации (ФНП № 505 и № 507) при отработке угольных и рудных месторождений необходимо осуществлять деятельность, направленную на предотвращение опасных проявлений горного давления (заколообразование и др.), а при ведении работ на удароопасных и склонных к горным ударам месторождениях — динамических явлений в шахтах (таких как горные удары, внезапные выбросы угля (породы) и газа, внезапные выдавливания угля, внезапные динамические разрушения пород почвы и др.). Для решения данных задач применяется широкий спектр видов прогноза динамических явлений, в том числе региональный прогноз по данным, полученным при ведении разведочных работ, являющийся основой геомеханического моделирования, и прогноз по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям.

Для организации сейсмических наблюдений шахта должна оснащаться системой сейсмического мониторинга. Широкое распространение на глубоких шахтах и рудниках России находит система «GITS» (разработана и произведена в АО «ВНИМИ») [7, 8]. Датчики системы устанавливаются в подземных выработках вокруг контролируемых участков шахтного поля. Результатом непрерывной работы такой системы является регистрация сейсмических событий и последующий расчет координат очага и энергии каждого события.

С течением времени формируется каталог сейсмической активности. Пространственное распределение очагов событий по шахтному полю и особенности их проявлений во времени позволяют выделять «зоны удароопасности», требующие контроля, уточнения напряженного состояния инструментальными методами и мероприятий по разгрузке породного массива.

Количество регистрируемых сейсмособытий при подземной разработке месторождений достигает десятков и иногда даже сотен событий различной энергии в сутки, на рис. 1 приведена статистика по сейсмособытиям на некоторых шахтах и рудниках РФ за один месяц.

Каждое происходящее в пределах горного отвода сейсмособытие тем или иным образом изменяет НДС массива, оперативный учет таких изменений позволит корректировать геомеханическую модель в реальном времени, что обеспечит более точное прогнозирование опасных проявлений горного давления, таких как горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, а также других динамических явлений. Внедрение алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ в систему сейсмического мониторинга способствует снижению риска аварийных ситуаций, минимизации экономических потерь и повышению устойчивости горных выработок, что особенно актуально при освоении удароопасных и склонных к горным ударам месторождений. Принципиальная схема алгоритма показана на рис. 2.

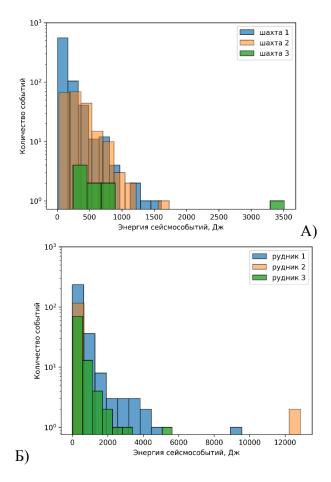


Рис. 1. Сейсмособытия, зарегистрированные системой «GITS» за один месяц на некоторых шахтах РФ (A) и на некоторых рудниках РФ (Б)

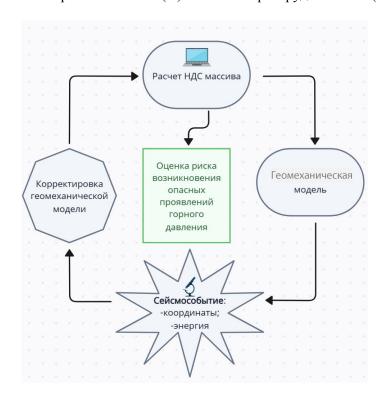


Рис. 2. Схема алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ

Работа алгоритма заключается в расчете исходной геомеханической модели массива горных пород, которая описывает начальное НДС массива. При возникновении сейсмического события в массиве система сейсмического мониторинга фиксирует его координаты и энергию. На основе этих данных, с учетом воздействия события на массив, выполняется корректировка геомеханической модели в соответствии с разработанной процедурой. После корректировки производится расчет обновленного НДС массива, что позволяет перейти к актуализированной геомеханической модели. На основе этой модели осуществляется непрерывная оценка риска возникновения опасных проявлений горного давления, что обеспечивает прогнозирование и предотвращение потенциальных аварийных ситуаций.

Для решения поставленной задачи в первую очередь необходимо выполнить моделирование параметров очага сейсмособытия и моделирование массива горных пород.

Моделирование параметров очага сейсмособытия

Возникающие в массиве горных пород сейсмические события (микроудары, горные, горно-тектонические удары, техногенные землетрясения) влияют на перераспределение НДС массива, вызывая либо разгрузку, либо рост напряжений на отдельных участках.

Очаг сейсмособытия представляет собой зону деформации массива, которая может быть охарактеризована объемом разрушенного материала. Размеры этой зоны имеют прямую зависимость от выделенной сейсмической энергии и могут быть определены на основе данных о местоположении и параметрах сейсмособытия. В литературе приводятся различные эмпирические зависимости между энергией сейсмособытия и объемом очага. Зависимость между энергией E и объемом очага V выражается формулой [5]:

$$E = 0.27 \cdot (10^{-2}) \cdot (V^{1.8}). \tag{1}$$

Данное соотношение свидетельствует о нелинейной зависимости между энергией и объемом, где увеличение объема очага приводит к экспоненциальному росту выделенной энергии. Зависимость имеет следующий вид [6]:

$$E = 10^2 \cdot V. \tag{2}$$

Здесь выражена линейная зависимость, где энергия пропорциональна объему очага. Это упрощенная модель, которая может применяться для определенных условий, но не учитывает более сложные механизмы в массиве горных пород.

В работе [9] приводятся экспериментальные данные, показывающие, что при землетрясениях и подземных взрывах плотность сейсмической энергии (E_c) и объемы источников упругих сейсмических волн (V_c) близки и практически описываются выражением

$$\lg E_c = \lg V_c + 3. \tag{3}$$

В работах [10, 11] оценку объема V (м³) зоны разрушения при горном ударе энергией E (Дж) предлагается выполнять по формуле

$$V = 3 \cdot 10^{-2} \cdot E. \tag{4}$$

После оценки параметров очага (его положения в массиве, энергии и объема зоны разрушения) может быть осуществлен пересчет НДС всего массива горных пород или его участка с учетом деформированной области с целью прогнозирования дальнейшего поведения системы под воздействием последующих горных работ или сейсмических событий. Влияние деформированной зоны на окружающий массив проявляется в перераспределении напряжений, что может приводить к дополнительным смещениям, деформациям или возникновению новых очагов разрушения.

В настоящей работе для моделирования влияния сейсмособытий на НДС массива горных пород были выбраны три значения объема очага сейсмособытий 125,

1000 и 3375 м³, что по (4) соответствует энергиям 4, 33 и 112 кДж. Область сейсмособытия моделировалась условно в виде куба с размерами сторон 5, 10 и 15 м в зависимости от принятой расчетной схемы. В пределах куба производилось уменьшение упруго-прочностных показателей породы в 10 и 100 раз относительно характеристик нетронутого массива.

Моделирование массива горных пород с выработкой

Моделирование проходки выработки в массиве горных пород производилось в программном комплексе «Fidesys» [12 – 14]. Задача решалась в упругопространственной постановке.

Массив представлен скальной горной породой со следующими характеристиками: модуль упругости — 50 Гпа; коэффициент Пуассона — 0,25; плотность — 2700 кг/м³. Выработка моделировалась сводчатой формы, высотой и шириной 5 м. Относительно данной выработки рассматривались различные варианты формирования зоны сейсмособытия. Область сейсмособытия располагается от выработки на расстоянии 5 м. Зона сейсмособытия в зависимости от расчетной схемы моделировалась сбоку или сверху относительно выработки.

Размеры модели в высоту, длину и ширину составляют 300 м. По поверхности модели было задано давление в 8 МПа, а также учтен вес пород в самой модели с помощью задания гравитационных сил. По приложенным нагрузкам и геометрии модели можно сказать, что проходка выработки осуществляется на глубине около 450 м. По боковым и нижней граням модели заданы граничные условия, запрещающие их поступательное перемещение.

Для сопоставления полученных результатов была также рассмотрена горная выработка без учета формирования сейсмособытия (рис. 3).

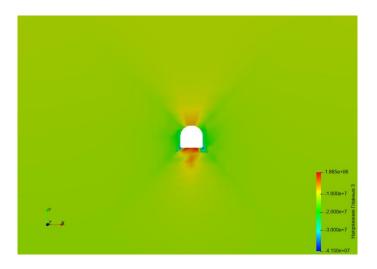


Рис. 3. Распределение напряжений σ3 в окрестности горной выработки по результатам моделирования (в программном комплексе «Fidesys» напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения — положительными)

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе было рассмотрено три значения объема очага — три значения ребра куба, которым моделировалось сейсмособытие (5, 10 и 15 м), сейсмособытия моделировались в двух направлениях — в стороне от выработки и над выработкой, на расстоянии 5 м. Рассматривалось два варианта снижения упругопрочностных свойств области сейсмособытия — в 10 и в 100 раз.

На рис. 4 представлены некоторые результаты моделирования и расчета влияния сейсмособытия на массив горных пород с выработкой.

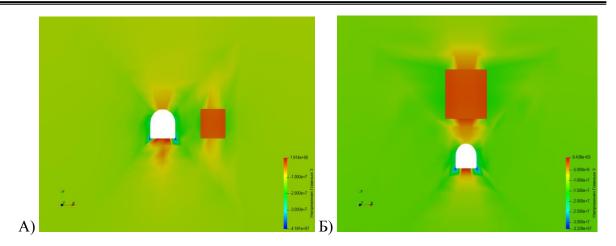


Рис. 4. Распределение напряжений σ3 в окрестности горной выработки и очага сейсмособытия по результатам моделирования

(А – сейсмособытие в стороне от выработки, размер ребра куба 5 м;

Б – сейсмособытие над выработкой, размер ребра куба 10 м)

(в программном комплексе «Fidesys» напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения – положительными)

Расчетом установлено, что существенное изменение НДС массива горных пород наблюдается на границе рассматриваемой области сейсмособытия, где происходит резкий скачок напряжений, после которого наблюдается спад напряжений и разгрузка массива в зоне сейсмособытия. Изменение НДС наблюдается на всем участке массива между контуром горной выработки и границей сейсмособытия, а также с противоположной стороны от сейсмособытия (рис. 5-6).

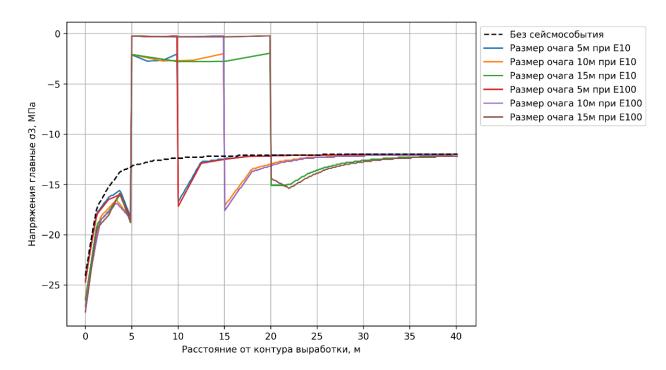


Рис. 5. Распределение главных напряжений (σ3) при снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз (Е10) и в 100 раз (Е100) в зависимости от размера области сейсмособытия (очаг сейсмособытия находится сбоку от выработки на расстоянии 5 м)

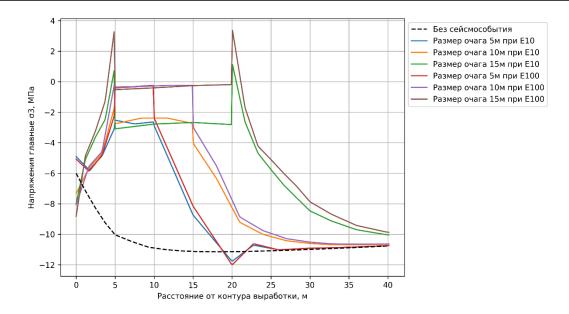


Рис. 6. Распределение главных напряжений (σ3) при снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз (Е10) и в 100 раз (Е100) в зависимости от размера области сейсмособытия (очаг сейсмособытия находится над выработкой на расстоянии 5 м)

На рис. 5-6 напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения - положительными.

Максимальные абсолютные отклонения главных напряжений (σ 3) в окрестности горной выработки для объемов очагов сейсмособытия, равных 125, 1000 и 3375 м³, составляют 11,08, 11,11 и 11,12 МПа, соответственно, при расположении сейсмособытия сбоку от выработки и снижения упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз. При снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 100 раз — те же параметры при соответствующих объемах очагов сейсмособытий составляют 12,96, 12,97 и 12,96 МПа.

Максимальные абсолютные отклонения главных напряжений (σ3) в окрестности горной выработки для объемов очагов сейсмособытия, равных 125, 1000 и 3375 м³, составляют 8,24, 8,62 и 12,25 МПа, соответственно – при расположении сейсмособытия над выработкой и снижения упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз. При снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 100 раз – те же параметры при соответствующих объемах очагов сейсмособытий составляют 10,64, 10,87 и 14,50 МПа.

Проведенный анализ результатов моделирования и расчета показывает, что максимальные отклонения главных напряжений (σ3) в массиве горных пород зависят от объема очага сейсмособытия, его расположения относительно выработки (сбоку или сверху) и уровня снижения упруго-прочностных свойств массива при моделировании, степень этих зависимостей необходимо уточнить. В дальнейшем необходимо более детально и масштабно исследовать влияние различных параметров сейсмособытий (объем очага, локализация, энергия, частота) на НДС массива.

Отклонения главных напряжений (σ 3) в массиве горных пород наблюдаются на расстояниях 3 — 4 размера ребра куба, которым моделируется сейсмособытие. Это указывает на влияние сейсмических событий на НДС массива как вблизи горных выработок, так и в их отсутствии.

В дальнейшем необходимо более детально изучить характер и масштаб этих отклонений при различных параметрах сейсмособытий, таких как размер и форма очага сейсмособытия, энергия и частота сейсмических событий, расположение очага

относительно выработки, степень снижения упруго-прочностных свойств массива и др. Необходимо также анализировать все три главных напряжения (σ 1, σ 2 и σ 3) совместно, т.к. только вместе они описывают НДС в элементарном объеме (условно в каждой точке массива). Такие исследования позволят установить количественные зависимости между параметрами сейсмособытий и изменениями НДС массива горных пород.

Заключение

В рамках разработки алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ на первом этапе было проведено моделирование влияния сейсмособытий на НДС массива горных пород при подземной разработке месторождений. В ходе настоящего исследования решались задачи моделирования участка массива и параметров очага сейсмособытия, а также оценка изменения НДС участка массива по результатам численного моделирования в зависимости от параметров сейсмособытий.

Анализируя данные, полученные в результате моделирования и оценки распределения главных напряжений в окрестности горной выработки, можно сделать вывод о том, что при рассмотренных параметрах модели массива горных пород, а также заданных параметрах сейсмособытий наблюдается заметное изменение НДС на расстояниях 25-40 м от контура выработки — максимум напряженности приходится на собственно сейсмоочаг, затем при дальнейшем удалении от выработки и очага напряжения гасятся еще через 10-15 м.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются

- обоснование связи между параметрами сейсмособытия и степенью снижения прочностных свойств в очаге сейсмособытия;
- оценка влияния дополнительных параметров сейсмособытий на изменение НДС массива горных пород (расстояние до горной выработки, минимальная энергия сейсмособытия, для которой необходим пересчет НДС массива и др.);
- исследование влияния серии сейсмособытий на кумулятивные изменения НДС и устойчивость выработок;
- разработка усовершенствованной модели, учитывающей анизотропные свойства массива и нелинейные эффекты перераспределения напряжений;
- интеграция численного моделирования с данными инструментального мониторинга для повышения точности прогнозов;
- разработка алгоритмов оперативной оценки влияния сейсмических событий в реальном времени с использованием методов машинного обучения;
- адаптация предложенной методики для различных горно-геологических условий и типов месторождений.

Дальнейшее развитие данного подхода позволит повысить эффективность управления геомеханическими рисками при подземной разработке месторождений.

Список литературы

- 1. Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Жукова С.А., 2021. Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 46–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46.
- 2. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е., 2022. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь». Уголь, № 12, С. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.
- 3. Mendecki A.J., 1997. *Seismic monitoring in mines*. London, Chapman and Hall. URL: https://www.researchgate.net/publication/346974170_Mendecki1997-Seismic-Monitoring -in-Mines-Book-Ch10 (дата обращения 20.06.2025)

- 4. Mendecki, A.J., 2023. Seismic ground motion alerts for mines. *J Seismol*, 27, 599-608 (2023). https://doi.org/10.1007/s10950-023-10147-7.
- 5. Ломакин В.С., Григорович С.В., Потехин Р.П., Халевин Н.И., 1989. О связи объема очаговой зоны разрушения с сейсмической энергией горного удара. *Геология и геофизика*, № 5, С. 129-132.
- 6. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В., 1983. О зависимости энергии землетрясения от объема сейсмического очага. Доклады АН СССР, Т. 271, № 3, С. 598-602.
- 7. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г., 2019. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*, № 9, С. 68-72. DOI 10.17580/gzh.2019.09.08.
- 8. Разумов Е.Е., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Простов С.М., 2021. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга. *Горный журнал*, № 1, С. 8-12.
- 9. Sadovskii M.A., Kedrov O.K., Pasechnik I.P., 1985. On the seismic energy and volume of foci at crustal earthquakes and underground explosions. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, Volume 283, Number 5, 1153-1156.
- 10. Карпенко В.В., Огородников Ю.Н., 2007. Параметры прямых продольных и поперечных сейсмических волн при горных ударах в скальных породах. *Записки Горного института*, №172, С. 14-17.
- 11. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И., 1986. К вопросу о классификации горных ударов. $\Phi T\Pi P\Pi U$, № 5, С. 3-11.
- 12. Соннов М.А., Котиков Д.А., Куранов А.Д., 2018. Применение CAE Fidesys в решении геомеханических задач. *Горная промышленность*, № 5(141), С. 90. DOI 10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92.
- 13. Гладков И.В., Якунчиков Е.Н., Румянцев А.Е., Соннов М.А., 2024. Моделирование влияния открытых горных работ на состояние нижележащего массива при планировании отработки подземным способом с применением программного комплекса САЕ Fidesys. *Горная промышленность*, № 4, С. 165–172. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-165-172
- 14. Батугин А.С., Мороз Н.Е., 2024. История развития и перспективы дальнейшего применения метода геодинамического районирования. *Горная промышленность*, № 3S, С. 14–19. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19.

References

- 1. Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A., 2021. Seismichnost' kak otrazhenie izmenenii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod v protsesse vedeniya gornykh rabot [Seismicity as a reflection of changes in the stress-strain state of a rock mass during mining operations]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6, P. 46–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46.
- 2. Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I., Moroz N.E., 2022. Monitoring napryazhennogo sostoyaniya seismicheskimi i raschetnymi metodami na shakhtakh AO "Vorkutaugol" [Monitoring of the stress state by seismic and computational methods at the mines of JSC Vorkutaugo]. Ugol', № 12, P. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.
- 3. Mendecki A.J., 1997. Seismic monitoring in mines. London, Chapman and Hall. URL: https://www.researchgate.net/publication/346974170_Mendecki1997-Seismic-Monitoring-in-Mines-Book-Ch10 (data obrashcheniya 20.06.2025)
- 4. Mendecki, A.J., 2023. Seismic ground motion alerts for mines. J Seismol, 27, 599-608 (2023). https://doi.org/10.1007/s10950-023-10147-7.
- 5. Lomakin V.S., Grigorovich S.V., Potekhin R.P., Khalevin N.I., 1989. O svyazi ob"ema ochagovoi zony razrusheniya s seismicheskoi energiei gornogo udara [On the relati-

- onship of the volume of the focal zone of destruction with the seismic energy of a rock impact]. Geologiya i geofizika, N_2 5, S. 129-132.
- 6. Sadovskii M.A., Pisarenko V.F., Shteinberg V.V., 1983. O zavisimosti energii zemletryaseniya ot ob"ema seismicheskogo ochaga [On the dependence of earthquake energy on the volume of a seismic source]. Doklady AN SSSR, V. 271, № 3, P. 598-602.
- 7. Mulev S.N., Pital' M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G., 2019. Sovremennye tekhnologii seismicheskogo monitoringa ugol'nykh shakht i rudnikov [Modern technologies of seismic monitoring of coal mines and mines]. Gornyi zhurnal, № 9, P. 68-72. DOI 10.17580/gzh.2019.09.08.
- 8. Razumov E.E., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Prostov S.M., 2021. Osnovnye printsipy postroeniya sistem seismicheskogo monitoring [Basic principles of building seismic monitoring system]. Gornyi zhurnal, № 1, P. 8-12.
- 9. Sadovskii M.A., Kedrov O.K., Pasechnik I.P., 1985. On the seismic energy and volume of foci at crustal earthquakes and underground explosions. Dokl. Akad. Nauk SSSR, Volume 283, Number 5, 1153-1156.
- 10. Karpenko V.V., Ogorodnikov Yu.N., 2007. Parametry pryamykh prodol'nykh i poperechnykh seismicheskikh voln pri gornykh udarakh v skal'nykh porodakh [Parameters of direct longitudinal and transverse seismic waves during rock impacts in rocks]. Zapiski Gornogo instituta, №172, P. 14-17.
- 11. Shemyakin E.I., Kurlenya M.V., Kulakov G.I., 1986. K voprosu o klassifikatsii gornykh udarov [On the classification of rock impacts]. FTPRPI, № 5, P. 3-11.
- 12. Sonnov M.A., Kotikov D.A., Kuranov A.D., 2018. Primenenie CAE Fidesys v reshenii geomekhanicheskikh zadach [Application of CAE Fidesys in solving geomechanical problems]. Gornaya promyshlennost', № 5(141), P. 90. DOI 10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92.
- 13. Gladkov I.V., Yakunchikov E.N., Rumyantsev A.E., Sonnov M.A., 2024. Modelirovanie vliyaniya otkrytykh gornykh rabot na sostoyanie nizhelezhashchego massiva pri planirovanii otrabotki podzemnym sposobom s primeneniem programmnogo kompleksa CAE Fidesys [Modeling the impact of open-pit mining on the condition of the underlying massif when planning underground mining using the CAE Fidesys software package]. Gornaya promyshlennost', № 4, P. 165–172. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4- 165-172
- 14. Batugin A.S., Moroz N.E., 2024. Istoriya razvitiya i perspektivy dal'neishego primeneniya metoda geodinamicheskogo raionirovaniya [History of development and prospects of further application of the geodynamic zoning method]. Gornaya promyshlennost', № 3S, P. 14–19. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19.