



Закономерности микросейсмической активности как индикатор динамических проявлений горного давления

П.А. Деменков, Е.Д. Силичева ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ romnva@yandex.com

Резюме: В работе исследованы особенности микросейсмической активности при динамических проявлениях горного давления в условиях рудников Хибинского массива горных пород. Анализ выполнен по данным микросейсмического мониторинга, включающим координаты гипоцентров, энергию событий, спектральные характеристики сигналов и временные параметры микросейсмической активности. Установлено, что развитию динамических проявлений предшествуют увеличение плотности микросейсмических событий, рост доли высокоэнергетических сигналов и пространственная локализация очагов разрушения в приконтурной части массива. Совместный анализ энергетических и пространственно-временных характеристик микросейсмической активности позволяет более надёжно оценивать развитие опасных геомеханических состояний по сравнению с использованием только энергетических критериев. Использование методов классификации позволило повысить устойчивость определения динамически активных зон по совокупности пространственно-временных параметров микросейсмической активности. Наиболее устойчивые результаты получены при использовании алгоритма Random Forest. Практическое значение работы связано с возможностью оперативного выявления участков локального перераспределения напряжений и повышения достоверности геомеханического контроля при ведении очистных работ на рудных месторождениях.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, геомеханика, горный массив, динамические проявления горного давления, машинное обучение, удароопасность

Для цитирования: Деменков П.А., Силичева Е.Д. Закономерности микросейсмической активности как индикатор динамических проявлений горного давления. *Горная промышленность*. 2026;(4S):134–141. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-134-141>

Patterns in microseismic activity as an indicator of dynamic manifestations of rock pressure

P.A. Demenkov, E.D. Silicheva ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ romnva@yandex.com

Abstract: The paper examines specific features of microseismic activity during dynamic manifestations of rock pressure in conditions of the mines in the Khibiny Mountain Range. The analysis is based on microseismic monitoring data, including position seismic center coordinates, event energy, spectral characteristics of the signals, and temporal parameters of the microseismic activity. It has been established that development of dynamic manifestations is preceded by an increase in the density of microseismic events, a rise in the share of high-energy signals, and the spatial localisation of the failure zones in the boundary part of the rock mass. It is shown that a joint analysis of the energy and spatio-temporal characteristics of microseismic activity makes assessment of the developing hazardous geomechanical states more reliable when compared to the use of energy criteria only. The use of classification methods made it possible to improve the reliability of identifying dynamically active zones based on a set of spatio-temporal parameters of microseismic activity. The most reliable results were obtained using the Random Forest algorithm. A practical significance of this work lies in the possibility to promptly identify the areas of local stress redistribution and improve the credibility of geomechanical monitoring during mining operations at ore deposits.

Keywords: microseismic monitoring, geomechanics, rock mass, dynamic manifestations of rock pressure, machine learning, shock hazard

For citation: Demenkov P.A., Silicheva E.D. Patterns in microseismic activity as an indicator of dynamic manifestations of rock pressure. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):134–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-134-141>

Введение

Разработка месторождений Хибинских апатит-нефелиновых руд сопровождается проявлением горного давления [1], возникающего под воздействием перераспределения напряжений [2] в массиве горных пород, в процессе ведения очистных работ (рис. 1).

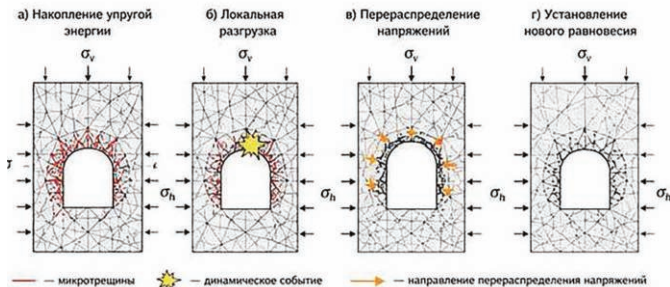


Рис. 1
Этапы развития проявлений горного давления в приконтурной зоне

Fig. 1
Stages in the development of rock pressure manifestations in the boundary zone

Контроль проявлений горного давления на подземных рудниках традиционно основан на региональных и локальных методах прогноза удароопасности [3–5]. Региональные методы используются для оценки общей геодинамической активности месторождения и выделения потенциально опасных участков. Локальные методы ориентированы на оперативное выявление признаков развития динамических процессов в пределах отдельных выработок и очистных блоков.

Материалы и методы

Анализ имеющихся методов

На рудниках Хибинского массива в качестве одного из основных инструментов прогноза удароопасности используется микросейсмический мониторинг [6; 7]. Интерпретация микросейсмических данных осложняется высокой изменчивостью параметров микросейсмической активности и сложным геологическим строением Хибинского массива.

Оценка удароопасности по данным микросейсмического мониторинга существенно зависит как от качества регистрации сигналов [8], так и от интерпретации результатов наблюдений. Она основывается на экспертной оценке параметров микросейсмической активности, включая энергию сигналов, пространственное распределение гипоцентров и изменение интенсивности событий [9]. Дополнительные трудности связаны с влиянием производственных шумов, погрешностями локализации очагов разрушения и отсутствием универсальных критериев разделения опасных и фоновых процессов [10]. Один из способов оценки – анализ выходов керна [11] с последующей оценкой его трещиноватости [12].

Методология исследования

Методология исследования основывалась на анализе пространственно-временной структуры микросейсмической активности [13] в приконтурной части массива и её связи с процессами развития динамических проявлений горного давления (рис. 2). Общая схема исследования включала последовательный переход от регистрации ми-

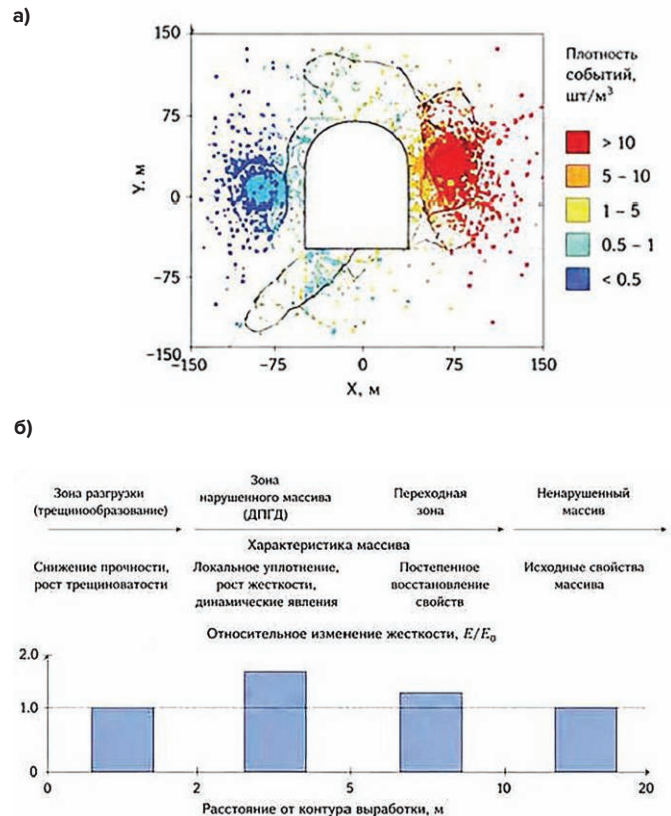


Рис. 2
Пространственно-временная структура микросейсмической активности:
а – распределения плотности микросейсмических событий в окрестности выработки;
б – изменение жесткости массива в пределах зон вокруг выработки

Fig. 2
The spatio-temporal structure of microseismic activity:
a – spatial distributions of the microseismic event density in the vicinity of the mine working;
б – changes in the rock mass stiffness within zones around the mine working

кросейсмических событий к выделению участков локального изменения напряжённого состояния массива [14].

Исследование выполнялось для участка подземной рудной разработки, характеризующегося зоной повышенного напряжённо-деформированного состояния и геологическими нарушениями в виде окисленных участков породы. Для рассматриваемого массива характерны повышенные горизонтальные напряжения, интенсивное развитие техногенной трещиноватости и выраженная пространственная неоднородность деформирования приконтурной зоны (рис. 3–5). Наличие разрывных нарушений и контрастных прочностных свойств пород определяет неравномерное перераспределение напряжений в процессе очистной выемки.

Контроль состояния массива осуществлялся с использованием автоматизированной системы микросейсмического мониторинга, она обеспечивала регистрацию микросейсмических сигналов, возникающих при локальном деформировании. Локализация микросейсмических событий выполнялась по временам прихода продольных и поперечных волн на приёмные станции (рис. 6). Для каждого события определялись координаты гипоцентра, энергия сигнала, длительность, доминирующая частота и положение относительно очистного фронта.

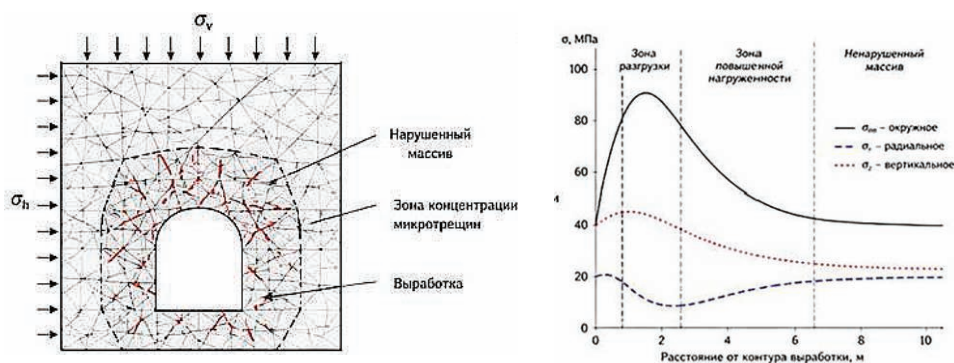


Рис. 3
Схема перераспределения напряжений в окрестности выработки и зона развития динамических проявлений горного давления

Fig. 3
Layout of stress redistribution in the vicinity of the mine working and the zone of

Рис. 4
График изменения компонент напряжений в массиве в направлении контура выработки

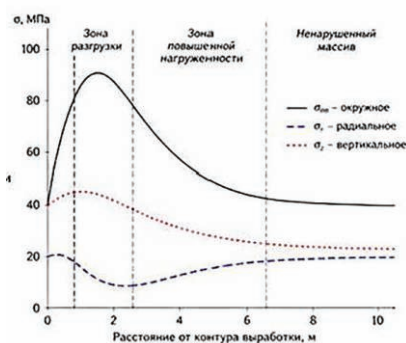


Fig. 4
A graph showing changes in the stress components within the rock mass towards the boundaries of the mine working

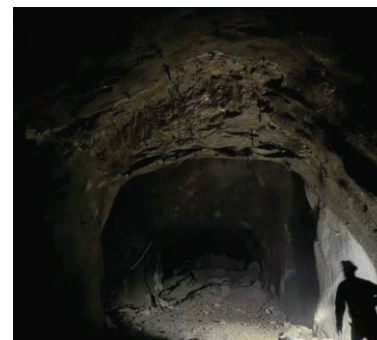


Рис. 5
Фотофиксация результата динамического проявления горного давления на

Fig. 5
Photographically recorded results of dynamic manifestations of rock pressure at the deposit

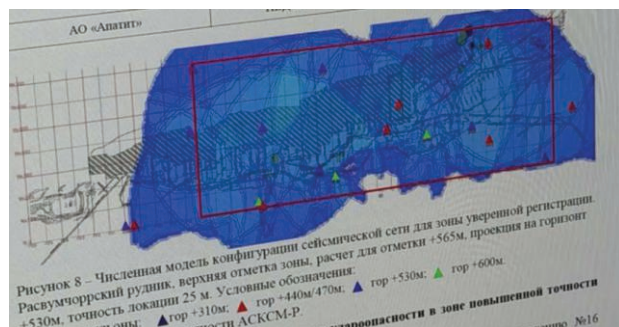


Рис. 6
Регистрация динамических проявлений горного давления с помощью датчиков АСКСМ на месторождении



Fig. 6
Registration of dynamic manifestations of rock pressure using the ASKSM sensors in-situ



Рис. 7
Типичная временная эволюция микросейсмической активности при развитии динамических проявлений горного давления

Fig. 7
A typical temporal evolution of the microseismic activity during the development of dynamic manifestations of rock pressure

В анализ включались события, зарегистрированные в периоды активного ведения очистных работ и изменения геомеханической обстановки в приконтурной зоне (рис. 7). Предварительная обработка данных включала удаление технологических шумов и событий с высокой погрешностью локализации.

Повышение плотности гипоцентров в приконтурной зоне интерпретировалось как признак локализации деформационных процессов и перераспределения напряжений в массиве. Рост доли низкочастотных сигналов связывался с процессами закрытия трещин и динамического уплотнения пород. Дополнительно оценивалось изменение соотношения между низко- и высокоэнергетическими событиями. Снижение доли слабых микросейсмических актов при одновременной концентрации событий средней энергии рассматривалось как признак повышения жёсткости массива и формирования зон локального заколачивания. Анализ микросейсмической активности выполнялся по параметрам, характеризующим изменение напряжённого состояния приконтурной зоны массива [15]. Оценивались пространственное распределение гипоцентров, изменение энергии событий, миграция активных зон и частотные характеристики сигналов. Рост плотности гипоцентров и формирование компактных кластеров вблизи очистного фронта рассматривались как признаки локализации деформаций и повышения жёсткости массива [16]. Увеличение доли низкочастотных сигналов связывалось с закрытием трещин и уплотнением пород [17]. Пространственно-временной анализ выполнялся в интервалах продолжительностью 24 ч. Оценивались изменение положения активных зон, плотность событий и изменение суммарной энергии.

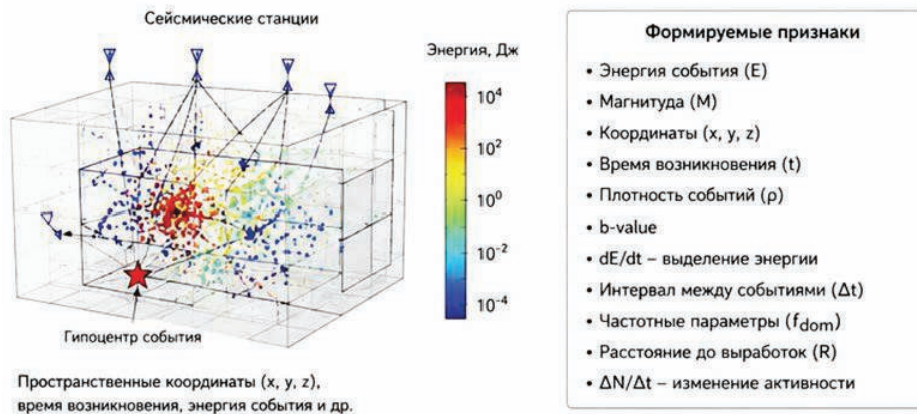


Рис. 8
Формирование информативного набора признаков микросейсмической активности

Fig. 8
Development of an informative set of indicators for microseismic activity

Смещение областей микросейсмической активности отражало перераспределение напряжений в приконтурной части массива (рис. 8). Для выделения зон повышенной динамической активности применялась пространственная кластеризация гипоцентров. Полученные параметры использовались при классификации участков массива по уровню геомеханической опасности [18].

Применение методов машинного обучения

Методы машинного обучения использовались для сопоставления участков массива по параметрам микросейсмической активности и выделения зон повышенной динамической активности [19]. В качестве входных данных применялись пространственные, энергетические и временные характеристики микросейсмических событий (рис. 9). Основной моделью являлся алгоритм Random Forest, обеспечивающий устойчивую обработку неоднородных микросейсмических данных, он оценивал относительную значимость признаков [20–22]. Дополнительно выполнялось сравнение результатов с алгоритмами SVM и многослойной нейронной сетью [23–26]. Классификация проводилась для разделения участков массива по уровню динамической активности на основе пространственной концентрации гипоцентров, изменения энергии событий и миграции микросейсмической активности [27; 28]. Оценка качества выполнялась по специальным метрикам для машинного обучения (Accuracy, Precision, Recall и F1-score) с использованием перекрёстной проверки [29; 30].

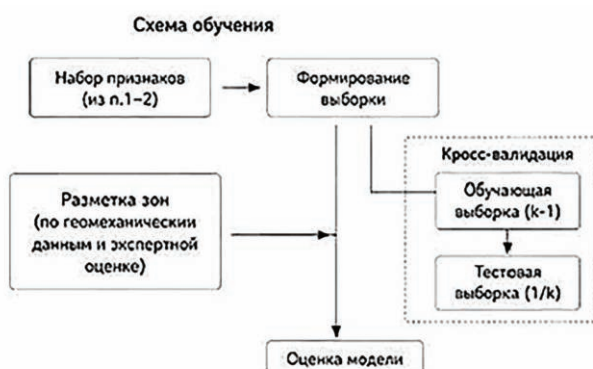
Результаты

Анализ микросейсмической активности продемонстрировал, что развитие динамических проявлений горного

давления связано с локальным перераспределением напряжений в зоне очистных работ и формированием участков повышенной жёсткости в приконтурной зоне массива. На ранних стадиях деформирования фиксировалось увеличение плотности низкоэнергетических событий, соответствующих развитию микротрещин и локальных сдвиговых деформаций. По мере роста напряжений происходила пространственная концентрация гипоцентров и наблюдалось увеличение доли событий средней энергии.

Перед развитием динамических проявлений горного давления наблюдалось смещение микросейсмической активности в сторону зоны опорного давления и уменьшение пространственного рассеяния гипоцентров. Одновременно возрастала доля низкочастотных сигналов, связанных с процессами закрытия трещин и уплотнения приконтурного массива.

Наиболее выраженные изменения микросейсмической активности фиксировались вблизи зон тектонического ослабления и контактов пород с различными прочностными свойствами. В этих участках перераспределение напряжений сопровождалось локализацией деформаций и развитием сдвиговых подвижек. Полученные закономерности соответствуют процессу перехода массива от распределённого трещинообразования к локализованному деформированию с формированием зон динамического заколачивания и повышенной концентрации напряжений. В ходе анализа микросейсмических данных установлено, что развитие динамических проявлений горного давления предшествует изменению пространственной структуры микросейсмической активности в приконтурной части массива. Для участков последующего развития динамических деформаций характерно увеличение плотности собы-



Используемые модели

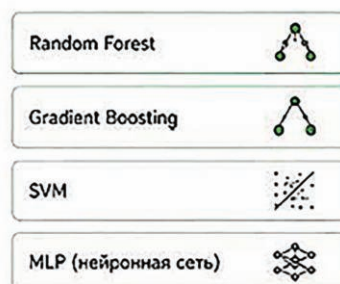
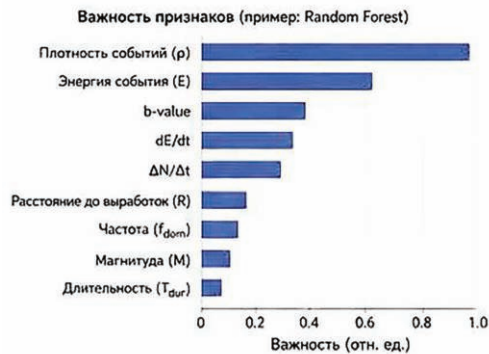


Рис. 9
Методика прогнозирования зон динамического проявления горного давления

Fig. 9
A methodology for predicting the areas with dynamic manifestations of rock pressure



Геомеханическая интерпретация значимых признаков

Признак	Физический смысл
Плотность событий (ρ)	Локализация участков с высокой подвижностью и концентрацией очагов релаксации
Энергия события (E)	Характеризует уровень высвобождаемой упругой энергии
b-value	Понижение b-value указывает на рост доли более энергичных событий
dE/dt	Отражает интенсивность выделения энергии во времени
$\Delta N/\Delta t$	Рост числа событий во времени – признак активации процесса
Расстояние до выработок (R)	Влияние горных работ и перераспределения напряжений

Рис. 10
Определение наиболее значимых признаков прогнозирования

Fig. 10
Identification of the most significant predictive factors

тий при одновременном сокращении пространственного рассеяния гипоцентров. Динамика отражает локализацию деформационных процессов и формирование зон повышенной жёсткости массива.

Результаты классификации показали, что наиболее информативными признаками являются пространственная концентрация гипоцентров, изменение суммарной энергии событий и миграция активных зон относительно очистного фронта (рис. 8). Наибольшую устойчивость (табл. 1) при обработке неоднородных микросейсмических данных продемонстрировал алгоритм Random Forest (табл. 2).

Таблица 1
Сравнение результатов моделей машинного обучения

Модель	Точность, %	Прецизионность	Полнота	F1-мера
Random Forest	87,6	0,85	0,83	0,84
SVM	81,9	0,79	0,76	0,77
MPL	85,1	0,83	0,80	0,81

Table 1
A comparison of the outcomes of different machine learning models

Таблица 2
Значимость признаков модели Random Forest

Признак	Значимость
Локальная плотность гипоцентров	0,23
Суммарная энергия события	0,21
Скорость миграции активности	0,14
Доля низкочастотных сигналов	0,11
Изменение активности во времени	0,09
Радиус пространственной концентрации	0,05

Повышение достоверности выделения динамически активных зон достигалось при совместном анализе энергетических и пространственно-временных характеристик микросейсмической активности (рис. 9). Использование только энергетических параметров не позволяло устойчиво выявлять участки локального перераспределения напряжений. Практическая проверка показала, что форми-

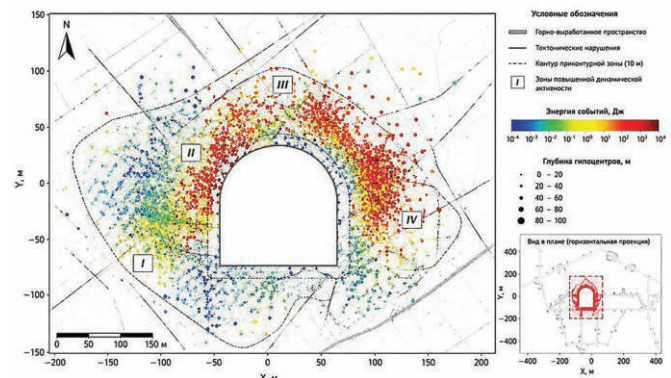


Рис. 11
Карта пространственного распределения микросейсмической активности

Fig. 11
A map of spatial distribution of microseismic activity

рование устойчивых кластеров гипоцентров и рост доли низкочастотных сигналов фиксировались за 12–18 ч до развития интенсивных деформационных процессов в приконтурной зоне массива.

Заключение

В работе исследованы закономерности изменения микросейсмической активности при развитии динамических проявлений горного давления в приконтурной части массива. Установлено, что наиболее информативными признаками изменения напряжённого состояния являются пространственная концентрация гипоцентров, миграция активных зон, изменение энергетической структуры событий и рост доли низкочастотных сигналов. Развитие динамических проявлений сопровождается локализацией деформационных процессов впереди очистного фронта, формированием участков повышенной жёсткости и уплотнением трещиноватого массива. Использование методов классификации позволило повысить устойчивость определения динамически активных зон по совокупности пространственно-временных параметров микросейсмической активности. Наиболее устойчивые результаты получены при использовании алгоритма Random Forest.

Практическое значение работы связано с возможностью оперативного выявления участков локального перераспределения напряжений и повышения достоверности геомеханического контроля при ведении очистных работ на рудных месторождениях.



Список литературы / References

1. Захаров Л.А., Мартышев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластового давления методами искусственного интеллекта. Записки Горного института. 202;253:23–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. Journal of Mining Institute. 202;253:23–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
2. Господариков А.П., Зацепин М.А., Киркин А.П. Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района. Записки Горного института. 2025;272:83–90. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16498> (дата обращения: 07.02.2026).
Gospodarikov A.P., Zatsepin M.A., Kirkin A.P. Determination of impact hazard potential of rocks in the Norilsk Industrial Region. Journal of Mining Institute. 2025;272:83–90. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16498> (accessed: 07.02.2026).
3. Разумов Е.Е., Простов С.М., Шабанов Е.А. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024;335(8):174–186. https://doi.org/10.18799/24131830_2024_8_4420
Razumov E.E., Prostov S.M., Shabanov E.A. Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2024;335(8):174–186. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830_2024_8_4420
4. Журавлева О.Г., Жукова С.А. Исследование пространственно-временных закономерностей развития сейсмичности в подработанной толще массива на Расвумчоррском руднике. Горная промышленность. 2024;(3):105–111. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-105-111>
Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. Studies of the spatial and temporal patterns of seismic activity development in the undermined rock mass at the Rasvumchorr Mine. Russian Mining Industry. 2024;(3):105–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-105-111>
5. Protosenya A., Kumov V. Geomechanical substantiation of soil stability during tunnel construction by shield tunneling complexes in layered massifs. Eng. 2026;7(3):108. <https://doi.org/10.3390/eng7030108>
6. Протосеня А.Г., Вербило П.Э., Иванов А.А. Оперативный прогноз устойчивости горных выработок с применением нейросетевого подхода. Устойчивое развитие горных территорий. 2026;18(1):28–38. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-1-28-38>
Protosenya A.G., Verbilo P.E., Ivanov A.A. Rapid prediction of mine working stability using a neural network approach. Sustainable Development of Mountain Territories. 2026;18(1):28–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-1-28-38>
7. Аухатов Ян.Г., Ситдикова Л.М., Исаев Г.Д. Визуальная оценка трещиноватости kernового материала с элементами геодинамической интерпретации (Западная Сибирь). Георесурсы. 2014;(1):48–50. <https://doi.org/10.18599/grs.56.1.9>
Aukhatov Ya.G., Sitdikova L.M., Isaev G.D. Visual assessment of core material fracturing with elements of geodynamic interpretation (Western Siberia). Georesursy. 2014;(1):48–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.56.1.9>
8. Гусев В.Н., Одинцов Е.Е., Жерлыгина Е.С. Расчет сдвижений и деформаций массива горных пород с учетом натурных данных. Горный журнал. 2025;(4):18–25. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.04.03>
Gusev V.N., Odintsov E.E., Zherlygina E.S. Calculation of displacements and deformations in rock mass with regard to field data. Gornyi Zhurnal. 2025;(4):18–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.04.03>
9. Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит». Записки Горного института. 2023;262:571–580. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9>
Gospodarikov A.P., Revin I.E., Morozov K.V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit. Journal of Mining Institute. 2023;262:571–580. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9>
10. Trushko V.L., Baeva E.K., Blinov A.A. Experimental investigation on the mechanical properties of the frozen rocks at the Yamal peninsula, Russian Arctic. Eng. 2025;6(4):76. <https://doi.org/10.3390/eng6040076>
11. Блинов П.А., Силичев Н.М., Никишин В.В., Гореликов В.Г. Обоснование и разработка отклонителя непрерывного действия с полным отбором керна для бурения геологоразведочных скважин. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025;336(7):17–28. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/7/4780>
Blinov P.A., Silichev N.M., Nikishin V.V., Gorelikov V.G. Justification and development of a continuous deflector with full core sampling for drilling exploration wells. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2025;336(7):17–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/7/4780>
12. Blinov P.A., Silichev N.M., Nikishin V.V., Gorelikov V.G. Substantiation and development of a methodology for calculating the bending of the drive shaft of a continuous deflector for drilling with coring. SOCAR Proceedings. 2025;(3):39–48. <https://doi.org/10.5510/OGP20250301095>



13. Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A. Concrete damage plasticity model application to predict stress-strain behavior of impermeable strata in deep rock salt deposits. *Geotechnics*. 2026;6(2):45. <https://doi.org/10.3390/geotechnics6020045>
14. Belikov A.A., Belyakov N.A. Method for ensuring geomechanical safety during undermining of water-protective strata. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025;17(1):115–125. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-1-115-125>
15. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В., Кузнецов Н.Н. Оценка степени удароопасности скальных горных пород на основе результатов лабораторных испытаний. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2019;22(1):138–148. Режим доступа: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=2002> (дата обращения: 11.03.2026).
Kozyrev A.A., Kasparyan E.V., Fedotova Yu.V., Kuznetsov N.N. Estimating the rockburst hazard of hard rocks based on laboratory test results. *Vestnik of MSTU*. 2019;22(1):138–148. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=2002> (accessed: 11.03.2026).
16. Demir S., Şahin E.K. Evaluation of oversampling methods (OVER, SMOTE, and ROSE) in classifying soil liquefaction dataset based on SVM, RF, and Naïve Bayes. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2022;(34):142–147. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1077867>
17. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Тимофеев М.И., Лавренко С.А. Моделирование и оптимизация использования проходческих комплексов при строительстве вспомогательных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):117–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_117
Jungmeister D.A., Urazbakhitin R.J., Timofeev M.I., Lavrenko S.A. Modeling and optimization of the use of tunneling complexes in the construction of auxiliary workings. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):117–135. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_117
18. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Нгуен К.Л., Тимофеев М.И. Комплекс для создания хранилищ особо опасных отходов: обоснование конструкции и параметров. *Обогащение руд*. 2023;(6):47–51. <https://doi.org/10.17580/or.2023.06.08>
Yungmeister D.A., Urazbakhitin R.Yu., Nguyen K.L., Timofeev M.I. Tunneling complex for the construction of especially hazardous waste storage facilities: justification of the design and parameters. *Obogashchenie Rud*. 2023;(6):47–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2023.06.08>
19. Дягилева А.В., Пылов П.А., Майтак Р.В., Николаева Е.А. Метрики и критерии качества моделей глубокого обучения для оценки точности прогнозирования сейсмического удара высокой энергии. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2025;(3):21–34. Режим доступа: <http://vestnik.nc-vostnii.ru/upload/iblock/4a4/gifmqa6r9qi7aj5hc162oux129o6fsj0.pdf> (дата обращения: 11.03.2026).
Dyagileva A.V., Pylov P.A., Majtak R.V., Nikolaeva E.A. Metrics and quality criteria of deep learning models for evaluating the accuracy of high-energy seismic shock prediction. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2025;(3):21–34. (In Russ.) Available at: <http://vestnik.nc-vostnii.ru/upload/iblock/4a4/gifmqa6r9qi7aj5hc162oux129o6fsj0.pdf> (accessed: 11.03.2026).
20. Сергунин М.П., Еременко В.А. Обработка структурных геологических моделей алгоритмами искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9):56–67. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_56
Sergunin M. P., Eremenko V. A. Application of artificial intelligence algorithm in processing structural geological models. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9):56–67. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_56
21. Cai M. Rockburst risk control and mitigation in deep mining. *Deep Resources Engineering*. 2024;1(2):100019. <https://doi.org/10.1016/j.deepre.2024.100019>
22. Синегубов В.Ю. Ретрополяционное прогнозирование уровня горнотехнических условий на глубоких горизонтах месторождения Олений Ручей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(9):15–35. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/9/7_2025_15-35.pdf (дата обращения: 11.03.2026).
Sinegubov V.Yu. Backcasting of geotechnical conditions at deep levels of the Oleniy Ruchey deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(9):15–35. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/9/7_2025_15-35.pdf (accessed: 11.03.2026).
23. Синегубов В.Ю. Разработка комплексного подхода к прогнозу напряженного состояния породного массива и апробация на месторождении Олений Ручей. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2025;(2):68–79. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-2-68-79>
Sinegubov V.Yu. Development of a comprehensive approach to predicting the stress state of the rock mass and testing it at the Oleniy Ruchey deposit. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025;(2):68–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-2-68-79>
24. Грунин А.П., Константинов А.В., Ломов М.Е. Передовые методы и средства геомеханического мониторинга на основе технологий машинного обучения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-2):166–179. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_166-179.pdf (дата обращения: 11.03.2026).
Grunin A.P., Konstantinov A.V., Lomov M.E. Advanced methods and tools for geomechanical monitoring based on machine learning technologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-2):166–179. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_166-179.pdf (accessed: 11.03.2026).



25. Tien D.L., Trung T.V., Anh S.D., Babyr N.V. Ground pressure and methods to enhance roof stability in mechanized coal mining. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2026;39(4):862–869. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.05>
26. Zhou J., Koopialipoor M., Li E., Armaghani D.J. Prediction of rockburst risk in underground projects developing a neuro-bee intelligent system. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020;79(8):4265–4279. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01788-w>
27. Piao S., Huang S., Wei Y., Tan J., Ma B. Enhancing the accuracy of rebound test to predict rock UCS: reliability analysis and a novel wave impedance-based approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2025;84(2):114. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04128-y>
28. Protosenya A., Ivanov A. Data-driven prediction of stress-strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models. *Mining*. 2026;6(1):4. <https://doi.org/10.3390/mining6010004>
29. Господариков А.П., Морозов К.В., Ревин И.Е. О методе обработки данных сейсмического и деформационного мониторинга при ведении подземных горных работ на примере Кикисвумчоррского месторождения АО «Апатит». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):157–168. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-157-168>
Gospodarikov A.P., Morozov K.V., Revin I.E. A method of data interpretation in seismicity and deformation monitoring in underground mining in terms of the Kukisvumchorr deposit of Apatit company. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):157–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-157-168>
30. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).

Информация об авторах

Деменков Петр Алексеевич – доктор технических наук, декан строительного факультета, профессор кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1599-8080>

Силичева Екатерина Дмитриевна – аспирант кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0001-2068-1769>; e-mail: romnva@yandex.com

Information about the authors

Petr A. Demenkov – Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Faculty of Civil Engineering, Professor of the Department of Mining Enterprise and Underground Structures, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1599-8080>

Ekaterina D. Silicheva – Postgraduate Student, Department of Mining Enterprise and Underground Structures Construction, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-2068-1769>; e-mail: romnva@yandex.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.06.2026
Поступила после рецензирования: 29.07.2026
Принята к публикации: 17.08.2026

Article info

Received: 02.06.2026
Revised: 29.07.2026
Accepted: 17.08.2026