ISSN 2712-8008
Том / Volume 26 №1 2026
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.831
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2026

Прогнозирование геодинамических явлений на основе высоконадежных предвестников разрушения горных пород и многоканальной технологии регистрации

В.В. Макаров, А.М. Голосов

Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10)

Forecasting geodynamic phenomena based on highly reliable precursors of rock destruction and multi-channel recording technology

Vladimir V. Makarov, Andrei M. Golosov

Far Eastern Federal University (10 Ajax village, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation)

Получена / Received: 01.08.2025. Принята / Accepted: 10.11.2025. Опубликована / Published: 12.01.2026

Ключевые слова:
геодинамические явления, прогноз, разрушение, система предвестников, долгосрочный предвестник среднесрочный предвестник, краткосрочный предвестник, образцы горных пород.

Решение проблемы повышения надежности прогноза геодинамических явлений, таких как горные удары при разработке месторождений, является одной из наиболее актуальных проблем современной геомеханики в связи с переходом горных работ в большинстве стран мира на глубокие горизонты. Применяемые в настоящее время критерии удароопасности на основе подхода «опасно-неопасно» не удовлетворяют возрастающим требованиям надежности прогноза. Альтернативный подход заключается в прогнозе геодинамических явлений на основе предвестников разрушения геосреды, однако в настоящее время надежные предвестники не разработаны. Отсутствует также и эффективная технология их регистрации. В статье с позиций геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов разработаны высоконадежные предвестники геодинамических явлений разрушения геосреды первого структурного уровня, рассматриваемые как критические точки процесса формирования и развития мезотрещинных структур горных пород и массивов. Исследованы закономерности деформирования и разрушения образцов горных пород в предразрушающей области нагружения, и разработана система высоконадежных предвестников разрушения, включающая долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный предвестники. Надежность предвестников обеспечивается закономерностями формирования и развития мезотрещинных структур горных пород, установленными в процессе всесторонних экспериментально-аналитических исследований. Идентификация предвестников производится на основе разработанной технологии многоканальной регистрации, обеспечивающей надежность прогноза геодинамических явлений на уровне 0,8–0,85. Практическая значимость проведенных исследований и разработок заключается в возможности использовать предвестники геодинамических явлений разрушения на следующем структурном уровне геосреды (породный массив на масштабе горных выработок) в соответствии с принципом транзита, отвечающим принципу связи между структурными уровнями в геомеханике сильно сжатых горных пород.

Keywords:
geodynamic phenomena, forecast, destruction, precursor system, long-term precursor, medium-term precursor, short-term precursor, rock samples.g

Improving the reliability of forecasting geodynamic phenomena (GDP), such as rock bursts during mining, is one of the most pressing issues in modern geomechanics, as mining operations in most countries worldwide are shifting to deep horizons. Currently used rock burst hazard criteria based on the "hazardous/non-hazardous" approach do not meet the increasing demands for forecast reliability. An alternative approach involves forecasting GDP based on precursors of geoenvironment failure; however, reliable precursors have not yet been developed. An effective technology for recording them is also lacking. In this article, highly reliable precursors of geodynamic phenomena of first-level geoenvironment failure are developed from the perspective of the geomechanics of highly compressed rocks and massifs. These precursors are considered critical points in the formation and development of mesofracture structures in rocks and massifs. The deformation and failure patterns of rock specimens in the pre-failure loading zone were investigated, and a system of highly reliable failure precursors was developed, including long-, medium-, and short-term precursors. The reliability of the precursors is ensured by the patterns of formation and development of mesofracture rock structures, established through comprehensive experimental and analytical studies. Precursor identification is based on the developed multichannel recording technology, ensuring the reliability of the GDP prediction at a level of 0.8–0.85. The practical significance of the conducted research and development lies in the possibility of using the GDP precursors at the next structural level of the geoenvironment (rock mass at the scale of mine workings) in accordance with the transit principle, which corresponds to the principle of the relationship between structural levels in the geomechanics of highly compressed rocks.

Макаров Владимир Владимирович (Author ID in Scopus: 22835820400, ORCID: 0000-0002-5335-4836) – доктор технических наук, профессор, e-mail: makarov.vv@dvfu.ru. Контактное лицо для переписки.
Голосов Андрей Михайлович (Author ID in Scopus: 56178606000, ORCID: 0000-0001-9775-819X) – кандидат технических наук, e-mail: golosov.am@dvfu.ru.

Vladimir V. Makarov (Author ID in Scopus: 22835820400, ORCID: 0000-0002-5335-4836) – Doctor of Science, Professor, e-mail: makarov.vv@dvfu.ru. The contact person for correspondence.
Andrei M. Golosov (Author ID in Scopus: 56178606000, ORCID: 0000-0001-9775-819X) – PhD, e-mail: golosov.am@dvfu.ru.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Макаров, В.В. Прогнозирование геодинамических явлений на основе высоконадежных предвестников разрушения горных пород и многоканальной технологии регистрации / В.В. Макаров, А.М. Голосов // Недропользование. – 2026. – Т.26, №1. – С. 38–45. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.4

Please cite this article in English as:
Makarov V.V., Golosov A.M. Forecasting geodynamic phenomena based on highly reliable precursors of rock destruction and multi-channel recording technology. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2026, vol.26, no.1, pp. 38-45. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.4

Введение

Прогноз геодинамических явлений (ГДЯ) типа землетрясений на структурном уровне земной коры и горных ударов на структурном уровне горных выработок при разработке месторождений остается нерешенной проблемой как для современной сейсмологии [1; 2], так и геомеханики [3]. И если сейсмологи все чаще заявляют о принципиальной невозможности надежного прогноза в связи со специфическим строением геосреды и отсутствием надежных предвестников землетрясений [4], то в области прогноза горных ударов только еще начинает осуществляться переход от качественных оценок удароопасности к прогнозу по предвестникам [5; 6]. Таким образом, проблема надежности прогноза геодинамических явлений смещается в область разработки высоконадежных предвестников. Поэтому работам в области прогноза горных ударов необходимо уделить особое внимание.

Горные удары рассматриваются в качестве геодинамических явлений на масштабе массива горных пород месторождений. Действующие в настоящее время в России инструкции предписывают прогноз горных ударов по оценке степени удароопасности месторождений и их участков (региональный и локальный прогноз) [7; 8]. Основным методом локального прогноза принят метод дискования кернов. К недостаткам принятого подхода относится недостаточность определения степени удароопасности, связанной с ограниченностью методов, основывающихся исключительно на оценке уровня напряженного состояния массива безотносительно к механизмам конкретного геодинамического явления [9].

В работах [10; 11] удароопасность месторождения и отдельных его участков связывается с механизмами развития макроразрушений в массиве (фолтов). Эти исследования развивают современные представления о геодинамических явлениях в массивах горных пород на масштабном уровне горных выработок, отмеченных в ряде работ на 9-м Международном симпозиуме по горным ударам и сейсмичности шахт [12– 14].

Анализ опыта снижения риска горных ударов за 100 лет эксплуатации месторождений золота Южной Африки приведен в [15]. Показано, что геодинамические явления такого типа развиваются в массиве после образования макроразрывов (фолтов) в местах концентрации напряжений. В работах Д. Ортлепа (W.D. Ortlepp) [16] на многочисленных фотографиях, сделанных при отработке месторождений Южной Африки, показана связь механизма горного удара с образованием макроразрыва (фолта), заключающаяся в том, что после образования очага макроразрыв возникает при появлении концентрации напряжений, вызванных горной выработкой [17] (рис. 1).

Идеи Д. Ортлепа развиваются в работе [18], где на примере горных ударов предлагается исследовать макроразрыв землетрясений (рис. 2). При этом подчеркивается идентичность процессов развития макроразрывов на всех трех масштабных уровнях: землетрясение – горный удар – образец горной породы в лаборатории.

Исследования, проведенные в КНР в последние десятилетия под руководством профессора М. Цая, также показывают переход массива в запредельную стадию деформирования после горного удара, что связано с развитием макроразрыва, сформированного в очаговой области подготовки сейсмического события [16]. Эти же принципы развиваются в работах китайских и других зарубежных ученых [19–22].

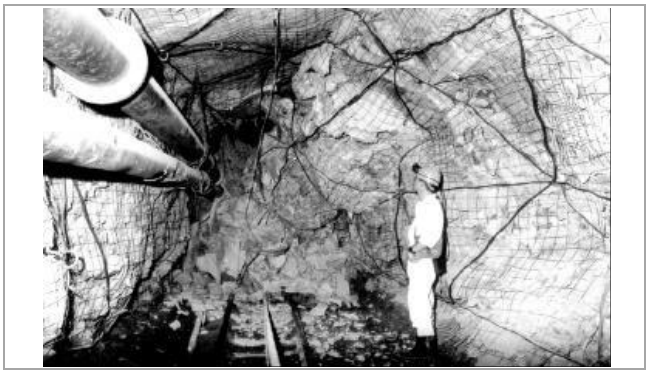


Рис. 1. Выработка в глубоком южноафриканском золотом руднике, разрушенная после горного удара с магнитудой ML = 3,6 (фотография W.D. Ortlepp) [17]

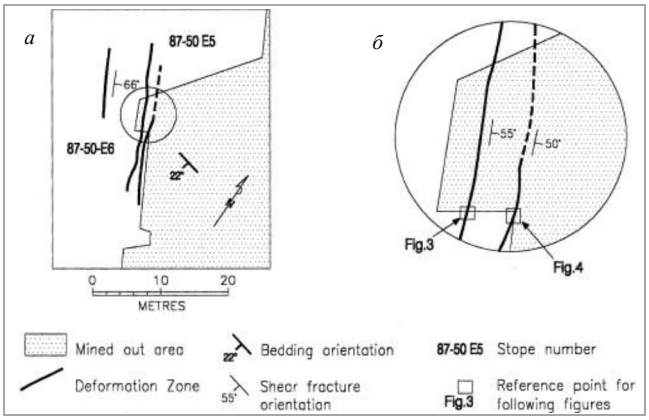


Рис. 2. Схематическая диаграмма, показывающая развитие фолтов в забое (*а*), выделенная кругом в увеличенном масштабе (*б*) [18]

Исследование механизмов горных ударов показывает, что на этом масштабном уровне геосреды геодинамические явления разрушения также проходят стадию подготовки и развития макродефектов (фолтов). Трудности исследования горных ударов заключаются в полной неопределенности времени и места их формирования.

В своей последней лекции, прочитанной online, один из наиболее известных зарубежных специалистов, проф. Фейхраст, рассматривавший вопросы динамического разрушения массива вокруг очистных и подготовительных горных выработок глубоких месторождений Южной Африки, указал на идентичность фолтов, вызывающих горные удары, и зонального разрушения массива (рис. 3).

По сравнению с исследованием горных ударов, место происхождения которых крайне неопределенно, исследование зонального развития макроразрушения вокруг глубоких выработок представляется весьма перспективным.

В работе [23] рассмотрены вопросы прогнозирования горных ударов с момента первого зарегистрированного горного удара в британской оловянной шахте в 1738 г. и дан обзор теоретических и экспериментальных исследований, проведенных за это время, в том числе при численном моделировании и других аспектах, для понимания механизма горного удара и влияющих факторов, и на этой основе разработки методов прогноза и раннего предупреждения горного удара [24–26]. Был исследован механизм горного удара с точки зрения напряженного состояния массива [27], энергии [28–30], жесткости [31; 32], устойчивости [33], фрактальной структуры [34], и предложен соответствующий индекс



Рис. 3. Зональное разрушение массива в результате локального развития макроразрывов в окрестности горных выработок



Рис. 4. Лаборатория геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов ДВФУ

прогнозирования горного удара. В соответствии с различными механизмами возникновения, Кайзер [36] разделил горные удары на две категории: спонтанный горный удар и вызванный внешним возмущением горный удар.

Первая категория в основном связана с внезапным высвобождением упругой энергии, накопленной в вмещающей породе при выемке, в то время как вторая связана со взрывной отбойкой, механической вибрацией, напряжением в массиве, вызванным в результате горного удара, землетрясением и т.д., а причиненный ущерб обычно находится на определенном расстоянии от источника воздействия [36; 37].

Yan et al. [38] обнаружили, что нарушения, вызванные горными работами, особенно взрывными, оказывают значительное влияние на масштаб и интенсивность горных ударов, и предложили методы предотвращения и управления горными ударами, вызванными взрывной технологией.

Li и Weng [39] численно изучали динамическое разрушение подземных горных выработок, подвергающихся статическим геонапряжениям и динамической нагрузке. Li et al. [40] указали, что глубокорасположенный массив горных пород неизбежно подвержен влиянию механического бурения, взрывных работ и других динамических возмущений, и влияние динамических возмущений следует учитывать при изучении горных ударов.

Li [41] обобщил современное состояние крепления выработок, подвергшихся воздействию горных ударов, и выдвинул идеи контроля. Анализ большого количества случаев горного удара показывает, что возникновение удароопасности должно соответствовать двум основным условиям:

– окружающая порода прочная, хрупкая и относительно ненарушенная, и может сохранить большое количество энергии упругой деформации [42];

– среда с высоким уровнем напряжений (включая напряжения in situ и индуцированные напряжения) [16; 43–45], где первое является внутренней причиной разрушения, а последнее – внешней.

Вышеупомянутые исследования улучшили понимание механизмов горных ударов и заложили основу для реализации мер по прогнозированию и предотвращению горных ударов на практике.

Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов, как теория критических состояний геосреды, вводит не только структурные уровни кристаллических состояний геовещества, но и рассматривает процесс подготовки макроразрушения как стадию накопления мезотрещин, завершающийся формированием мезотрещинных структур контрастного типа [1, 46]. Это, в свою очередь, обусловливает необходимость рассмотрения закономерностей формирования и развития таких структур с выделением критических точек, которые могут быть рассмотрены в качестве предвестников макроразрушения.

Идентификация критических состояний геосреды, выделение этапов развития мезоструктур контрастного типа, определение параметров регистрирующих систем – все это является отдельными элементами технологии регистрации предвестников, надежность результатов реализации которой обеспечивается многоканальностью информационного обеспечения.

Иерархичность структурных уровней геосреды определяет и другой аспект прогнозирования, обусловленный особенностями связи между соседними структурными уровнями. Это позволяет разрабатывать систему предвестников иерархически нижнего, соседнего структурного уровня с переносом результатов на соседний верхний с учетом принципа транзита предвестников. Поэтому необходимо, прежде всего, разработать систему предвестников, включающих долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный, для первого структурного уровня геосреды – образца горных пород, а затем рассматривать аналогичную систему для массива.

В этой связи отправной точкой является двухстадийная модель разрушения, где за стадией хаотического растрескивания следует стадия объединения микродефектов и формирования макропроцесса разрушения [39; 47]. Недостатком проведенных в [47] исследований, ставших классическими, является отсутствие измерения локальных деформаций непосредственно в очаговой и околоочаговой областях подготовки макроразрушения. Требует также дополнения двухстадийная модель разрушения в связи с рассмотрением мезотрещинного процесса разрушения, необходимого в моделях геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов [40].

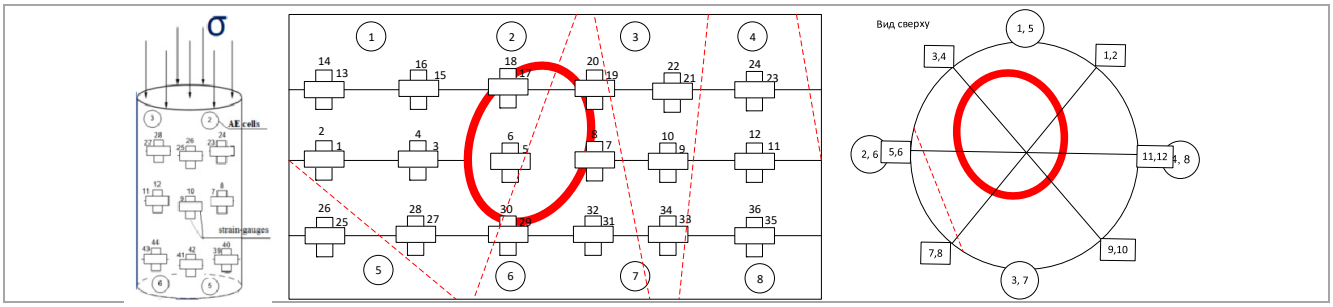


Рис. 5. Комплексный деформационно-акустический метод: положение очаговой области и схема измерений

Предлагаемый подход предполагает наличие оборудования высокого уровня как для нагрузочного устройства, так и систем регистрации, поскольку критические состояния для образцов скальных горных пород наступают, как правило, на завершающих 2–5 МПа перед макроразрушением. Этим требованиям удовлетворяет испытательный комплекс Центра геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов Политехнического института ДВФУ.

В соответствии с представлениями геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов, блочная геосреда имеет четыре структурных уровня, первым (нижним) из которых является породный образец, а горные выработки относятся ко второму структурному уровню [1]. Исследование закономерностей формирования и развития мезотрещинных структур образцов горных пород в предразрушающем состоянии проведено в Лаборатории геомеханики сильного сжатия ПИ ДВФУ на оборудовании мирового уровня, включающем сервоуправляемое нагрузочное устройство MTS-816 и две измерительные системы: акустико-эмиссионный комплекс Vallen AMSY 6 и деформационную систему «Устройство измерительно-управляющее» (УИУ), 2002 г. (рис. 4).

Разработан комплексный метод исследований процессов формирования и развития мезотрещинных структур образцов горных пород, позволяющий надежно фиксировать аномальные эффекты деформирования и разрушения горных пород, связанные с критическими точками подготовки макроразрушения [41]. Метод заключается в использовании многоканальной системы регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ), обеспечивающей определение гипоцентров индивидуальных мезотрещин, а также регистрации деформационных аномалий по многоточечной схеме размещения тензорезисторов на боковой поверхности образца [48; 49].

Исследования, проведенные на различных типах скальных пород при одноосном сжатии, показывают, что очаговая область подготовки макроразрушения может быть представлена эллипсоидом, средний диаметр которого зависит от размеров преобладающих в образце минеральных зерен.

Общий типичный вид очаговой области представлен на рис. 5 (красная сплошная линия), где штрихпунктиром обозначены проекции макротрещин разрушения.

Надежные предвестники геодинамических явлений разрушения образцов горных пород: долгосрочный и среднесрочный

В связи с рассмотрением мезоуровня разрушения двухстадийная модель [39], где за стадией хаотического

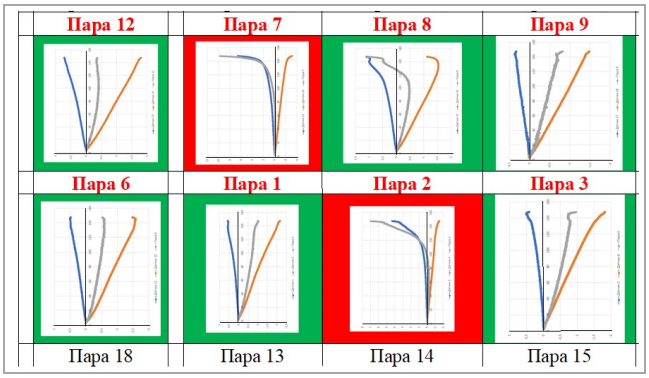


Рис. 6. Закономерности деформирования сильно сжатых образцов горных пород: красные ячейки – очаговая область; зеленые – околоочаговая область

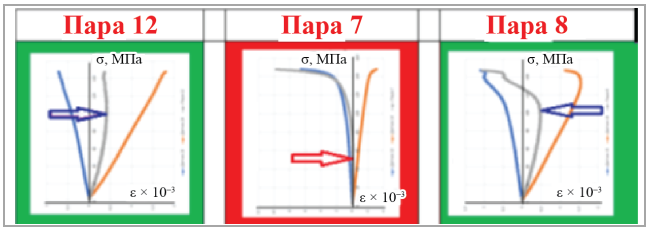


Рис. 7. Долгосрочный и среднесрочный предвестники ГДЯ первого структурного уровня геосреды: пара *7* – очаговая область; пары *8* и *12* – околоочаговая область подготовки макроразрушения

растрескивания следует стадия объединения микродефектов и формирования макропроцесса разрушения, дополнена стадией формирования мезотрещинной структуры, являющейся следствием локализации и взаимодействия мезотрещин, имеющих сдвиго-отрывной характер и возникающих на границах минеральных зерен.

В результате взаимодействия мезотрещин формируется очаговая область подготовки макроразрушения, в пределах которой линейные деформации приобретают аномально большое значение, а кривая объемных деформаций приобретает *U*-образную форму, где точка экстремума соответствует порогу дилатансии (рис. 6). Очаговую область подготовки макроразрушения (пары датчиков *2* и *7*) принято рассматривать как мягкое включение, на контакте которого с относительно малонарушенным материалом образца возникает концентрация напряжений [50].

Дальнейшее нагружение образца приводит к развитию дилатансионных процессов в околоочаговой области и, таким образом, достижению здесь также порога дилатансии, что свидетельствует о переходе материала всего образца в дилатированное состояние (пары *8* и *12*). Отличие этих процессов от аналогичных процессов в очаговой области

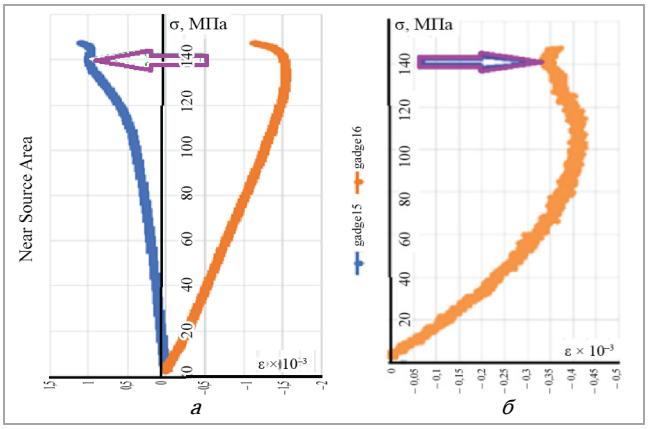


Рис. 8. Характер линейных реверсивных (*а*) и *S*-образных объемных (*б*) деформаций в околоочаговой области подготовки макроразрушения на стадии предразрушения

заключается в том, что кривая объемных деформаций приобретает *S*-образную форму.

Момент достижения порога дилатансии в очаговой области подготовки макроразрушения принимается за долгосрочный предвестник. Аналогичная точка на кривой объемной деформации в околоочаговой области принимается за среднесрочный предвестник (рис. 7). Оба предвестника являются неотъемлемой частью процесса разрушения и, в силу этого, являются надежными.

Из рис. 7 хорошо видна разница в уровне напряжений, соответствующих долго- и среднесрочному предвестникам: 50 и 100 МПа соответственно.

Надежный краткосрочный предвестник: момент формирования мезоструктуры разрушения

В результате дальнейшего нагружения материал образца переходит в предразрушающее состояние с формированием мезотрещинной структуры контрастного типа, включающей очаговую и околоочаговую области подготовки макроразрушения [48]. Завершение процесса формирования мезоструктуры характеризуется реверсом линейных деформаций в околоочаговой области подготовки (рис. 8), что обусловлено фазовым переходом материала образца в очаговой области и деформированием ее в режиме «мягкого включения».

Формирование мезотрещинной структуры приводит к возникновению латентных напряжений, имеющих осциллирующий характер, что является причиной возникновения реверсивных линейных деформаций в околоочаговой области и проявляется также в *S*-образной форме объемных. Модель латентных напряжений разработана М.А. Гузевым, и вместе с результатами сравнения теоретических и экспериментально полученных линейных деформаций рассмотрена в нашей статье в этом номере [51].

Точка на кривой линейных деформаций, соответствующая началу реверсивного деформирования, принимается за краткосрочный предвестник ГДЯ разрушения на первом структурном уровне геосреды. Предвестник также является надежным, поскольку соответствует уровню напряжений, при достижении которого начинается процесс формирования мезотрещинной структуры контрастного типа, в очаговой области которой происходит подготовка макроразрушения.

Технология многоканальной регистрации предвестников и ее надежность

Получение системы надежных предвестников ГДЯ разрушения геосреды первого структурного уровня (образцы горной породы) делает актуальной проблему разработки технологии их эффективной регистрации, позволяющей осуществлять надежный прогноз момента разрушения. В этой связи перспективным представляется путь повышения надежности прогноза на пути разработки многоканальной системы регистрации предвестников, включающей, где под информационными каналами понимаются независимые источники, позволяющие однозначно идентифицировать тот или иной предвестник.

Технология многоканальной регистрации предвестников ГДЯ разрушения геосреды первого структурного уровня (образцы горной породы) основана на использовании комплексного деформационно-акустического метода измерения независимых процессов деформирования и разрушения образцов горных пород. Дополнительными информационными каналами являются сигналы о формировании не только очаговой, но и околоочаговой области подготовки макроразрушения [49].

Так, алгоритм регистрации долгосрочного предвестника заключается в том, что на основании данных о достижении порога дилатансии по деформационной системе измерений и регистрации первых высокоамплитудных сигналов по акустической системе идентифицируется положение очаговой области подготовки макроразрушения и выделяется околоочаговая область, несущая информацию о среднесрочной предвестнике. При уровне вероятности регистрации сигналов деформационной (P_1) и акустической (P_2) систем до 0,6; уровень надежности регистрации долгосрочного предвестника оценивается как [52]: $P = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0{,}84$.

Технология регистрации среднесрочного предвестника заключается в том, что на основании данных о достижении уровня напряжений, соответствующем долгосрочному предвестнику, и выделенным очаговой и околоочаговой областям подготовки макроразрушения, определяется момент достижения порога дилатансии по деформационной системе измерений и регистрации первого максимума высокоамплитудных сигналов по акустической системе на участках, соответствующих положению околоочаговой области.

Аналогично определяется уровень напряжений, соответствующий моменту формирования мезотрещиной структуры и краткосрочному предвестнику ГДЯ разрушения геосреды первого структурного уровня (образцы горной породы) – по точке реверса линейных деформаций в околоочаговой области, а также максимальной интенсивности АЭ в очаговой области подготовки макроразрушения. В этом случае надежность прогноза макроразрушения образца горной породы возрастает за счет использования дополнительного независимого информационного канала, каким является очаговая область.

В целом, технологии многоканальной регистрации предвестников макроразрушения разрушения геосреды первого структурного уровня (образцы горной породы) обеспечивают надежность прогноза на уровне 0,8–0,85. Дальнейшее повышение уровня надежности прогноза возможно на пути использования возможностей моделей машинного обучения [53].

Заключение

Использование методов геомеханики сильно сжатых пород и массивов в целях разработки высоконадежных технологий регистрации предвестников ГДЯ показывает свою высокую эффективность. Предвестники

макроразрушения рассматриваются как критические точки в процессе формирования и развития мезотрещинных структур, возможность эффективной регистрации которых обеспечивается разработанным авторами комплексным деформационно-акустическим методом.

Созданные технологии регистрации предвестников первого структурного уровня геосреды (образцы горных пород), включающие долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный предвестники, имеют надежность 0,8–0,85. Перенос полученных результатов на следующий структурный уровень геосреды (породный массив на масштабе горных выработок) обеспечивается принципом транзита предвестников. Повышение надежности представленных технологий возможно на пути использования моделей машинного обучения.

Библиографический список

1. Makarov, V.V. Development of geomechanics of highly compressed rocks and rock masses in Russia / V.V. Makarov, M.A. Guzev, V.N. Odintsev // Geohazard Mechanics. – 2025. – Vol. 3, no. 1. – P. 42–58. DOI: 10.1016/j.ghm.2025.02.002
2. Keilis-Borok, V.I. Fundamentals of earthquake prediction: four paradigms / V.I. Keilis-Borok // Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. – P. 1–36. DOI: 10.1007/978-3-662-05298-3_1
3. Wang, C. Evolution, monitoring and predicting models of rockburst: Precursor information for rock failure / C. Wang. – Springer Nature, 2018. – 188 p. DOI: 10.1007/978-981-10-7548-3
4. Богомолов, Л.М. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы / Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева // Геосистемы переходных зон. – 2022. – Т. 6, № 3. – С. 145–182. DOI: 10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182
5. Rockburst evolutionary process and energy dissipation characteristics / D. Song [et al.]. – Singapore: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-981-13-6279-8
6. Numerical modeling for rockbursts: A state-of-the-art review / J. Wang [et al.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 13, no. 2. – P. 457–478. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.011
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2013 г. № 576). – М.: Недра, 2013. – 78 с.
8. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение Олений ручей) / А.А. Козырев [и др.]. – 2015.
9. Рассказов, И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И.Ю. Рассказов. – М.: Горная книга, 2008. – 329 с.
10. Батугин, А.С. Геодинамические явления и триггерный эффект в разрушении массива пород на шахте Хуафэн / А.С. Батугин, В.Н. Одинцев, Юй Лицзян // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы IY Всерос. конф. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 18.
11. Особенности гидрогеомеханического состояния массива при подработке водных объектов / М.А. Иофис, В.Н. Одинцев, Н.А. Милетенко, Н.А. Митишова // Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность: тр. междунар. науч.-техн. конф. – Магнитогорск, 2017. – С. 168–171.
12. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why / S. Lasocki, B. Orlecka-Sicora, G. Mutke [at al.] // Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. – Santiago, Chile, 2017. – P. 316–324.
13. Seedsman, R.W. Application of rock-burst concepts to understanding the sudden collapse of ribs in coal mines / R.W. Seedsman // Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. –Santiago, Chile, 2017. – P. 297–303.
14. Van Aswegen, G. Seismic sources and rockburst damage in South Africa and Chile / G. Van Aswegen // Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. –Santiago, Chile, 2017. – P. 72–86.
15. Durrheim, R.J. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South African: 100 years of research / R.J. Durrheim // Extracting the Science: a century of mining research. – 2010. – P. 156–171.
16. Cai, M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine / M. Cai // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. 2. – P. 204–211. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.11.002
17. Ortlepp, W.D. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts / W.D. Ortlepp, T.R. Stacey // Tunnelling and Underground Space Technology. – 1994. – Vol. 9, no. 1. – P. 59– 65. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90010-8
18. The nature of a deformation zone and fault rock related to a recent rockburst at Western Deep Levels Gold Mine, Witwatersrand Basin, South Africa / R.A. Stewart [et al.] // Tectonophysics. – 2001. – Vol. 337, no. 3–4. – P. 173–190. DOI: 10.1016/S0040-1951(01)00028-2
19. Zhou, Y. PNN-based rock burst prediction model and its applications / Y. Zhou, T. Wang // Earth Sciences Research Journal. – 2017. – Vol. 21, no. 3. – P. 141–146. DOI: 10.15446/esrj.v21n3.65216
20. Prediction and integrated prevention technology of dynamic disasters combined rock burst and gas outburst in deep mine / Z. Yang, Ch. Liu, H. Zhu, J. Wu // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2017. – No. 22 (2). – P. 477–488. DOI: 10.1038/s41598-025-91518-7
21. A semi-quantitative coal burst risk classification system / O. Vardar [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28, no. 5. – P. 721–727. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.08.001
22. Iannacchione, A.T. Occurrence, predication, and control of coal burst events in the US / A.T. Iannacchione, S.C. Tadolini // International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – Vol. 26, no. 1. – P. 39-46. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.11.008
23. Rockburst precursors and the dynamic failure mechanism of the deep tunnel: A review / Y. Chen [et al.] // Energies. – 2021. – T. 14. – №. 22. – C. 7548. – https://doi.org/10.3390/en14227548
24. Ortlepp, W.D. Rock burst mechanisms in tunnels and shafts / W.D. Ortlepp, T.R. Stacey // Tunn. Undergr. Space Technol. – 1994. – No. 59. – P. 59–65. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90010-8
25. Study on the development process of rockbursts / X.T. Feng, Y.X. Xiao, G.L. Feng [et al.] // Chin. J. Rock Mech. Eng. – 2019. – No. 38. – P. 1–25. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0103
26. Wang, J.-A. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks / J.-A. Wang, H. Park // Tunn. Undergr. Space Technol. – 2001. – No. 16. – P. 49–57. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00030-X
27. Tao, Z.Y. Support design of tunnels subjected to rockbursting / Z.Y. Tao // ISRM International Symposium. – Madrid, Spain, 1988. DOI: 10.1016/0148-9062(89)91954-2
28. Kidybi´nski, A. Bursting liability indices of coal / A. Kidybi´nski // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Géoméch. Abstr. – 1981. – No. 18. – P. 295–304. DOI: 10.1016/0148-9062(81)91194-3
29. Rock Burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at jinping II hydropower station, China / B.-R. Chen, X.-T. Feng, Q.-P. Li [et al.] // Rock Mech. Rock Eng. – 2015. – No. 48. – P. 289–303. DOI: 10.1007/s00603-013-0524-2
30. Altindag, R. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency / R. Altindag // Rock mechanics and rock engineering. – 2010. – Vol. 43, no. 3. – P. 361–370. DOI: 10.1007/s00603-009-0057-x
31. Cook, N.G.W. The failure of rock / N.G.W. Cook // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1965. – Vol. 2, no. 4. – P. 389–403. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90004-5
32. Tang, L. Seismological method for prediction of areal rockbursts in deep mine with seismic source mechanism and unstable failure theory / L. Tang, K.W. Xia // Journal of Central South University of Technology. – 2010. – Vol. 17, no. 5. – P. 947–953. DOI: 10.1007/s11771-010-0582-5
33. Linkov, A.M. Rockbursts and the instability of rock masses / A.M. Linkov // International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. – 1996. – Vol. 33, no. 7. – P. 727–732. DOI: 10.1016/0148-9062(96)00021-6
34. Xie, H. Fractal character and mechanism of rock bursts / H. Xie, W.G. Pariseau // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1993. – Vol. 30, no. 4. – P. 343–350. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91718-X
35. Kaiser, P.K. Canadian rockburst support handbook / P.K. Kaiser; Geomechanics Research Centre: Sudbury, CO. – Canada, 1996.
36. Huang, R.Q. Analysis of dynamic disturbance on rock burst / R.Q. Huang, X.N. Wang // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 1999. – Vol. 57, no. 3. – P. 281–284. DOI: 10.1007/s100640050046
37. Rockburst laboratory tests database – application of data mining techniques / M. He [et al.] // Engineering Geology. – 2015. – Vol. 185. – P. 116–130. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.12.008
38. Mitigation of rock burst events by blasting techniques during deep-tunnel excavation / P. Yan [et al.] // Engineering Geology. – 2015. – Vol. 188. – P. 126–136. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.01.011
39. A two-stage model of fracture of rocks / V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskay, D. Lockner // Pure and Applied Geophysics. – 1996. – No. 146 (2). – P. 253–263. DOI: 10.1007/BF00876492
40. Гузев, М.А. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук / М.А. Гузев, В.Н. Одинцев, В.В. Макаров // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук учредители: институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 42–52. DOI: 10.15372/FPVGN2021080106
41. Макаров, В.В. Комплексные предвестники геодинамических явлений разрушения горных пород и технология их регистрации / В.В. Макаров, А.М. Голосов // Проблемы геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов: XIII Междунар. российско-китайская конф. по геомеханике больших глубин, 28 июля – 1 августа 2025 г. – Владивосток: Изд-во Дальневосточн. фед. ун-та, 2025. – С. 54–56. DOI: 10.24866/7444-5951-2.

42. Cai, M. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring / M. Cai, P.K. Kaiser, C.D. Martin // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2001. – Vol. 38, no. 8. – P. 1135–1145. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00068-5
43. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800 m / T.-B. Zhao, W.-Y. Guo, Y.-L. Tan [et al.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2018. – Vol. 51, no. 5. – P. 1539–1564. DOI: 10.1007/s00603-018-1411-7
44. Kaiser, P.K. Design of rock support system under rockburst condition / P.K. Kaiser, M. Cai // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2012. – Vol. 4, no. 3. – P. 215–227. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00215
45. Martini, C.D. Observations of brittle failure around a circular test tunnel / C.D. Martini, R.S. Read, J.B. Martino // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1997. – Vol. 34, no. 7. – P. 1065–1073. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)90200-8
46. Гольдин, С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения / С.В. Гольдин // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 5–14.
47. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite / D.A. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko [et al.] // Nature. – 1991. – Vol. 350, no. 6313. – P. 39–42. DOI: 10.1038/350039a0
48. Mesocracking structures of the “source type” in highly stressed rocks / V.V. Makarov [et al.] // Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. – Australian Centre for Geomechanics, 2017. – P. 403–411. DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_28_Makarov
49. Макаров, В.В. Способ определения напряженно-деформированного состояния образцов горных пород. Патент на изобретение № 2020143874 / Макаров В.В., Голосов А.М., Морковин А.В. – БИ, 2021, № 27; опубл. 24.09.2021.
50. Rice, J.R. The mechanics of earthquake rupture / J.R. Rice // Providence: Division of Engineering. – 1979. – Vol. 720. – P. 721.
51. Макаров, В.В. Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов. Истоки, методы, основные результаты / В.В. Макаров, М.А. Гузев, В.Н. Одинцев // Недропользование. – № 1. – 2026.
52. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем / В.Ю. Шишмарев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2025. – 289 с.
53. Голосов, А.М. Технология эффективной регистрации предвестников геодинамических явлений разрушения горных пород на основе методов машинного обучения / А.М. Голосов, В.В. Макаров // Проблемы геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов: XIII Междунар. российско-китайская конф. по геомеханике больших глубин, 28 июля – 1 августа 2025 г. – Владивосток: Изд-во Дальневосточн. фед. ун-та, 2025. – С. 115–118. DOI: 10.24866/7444-5951-2

References

1. Makarov V.V., Guzev M.A., Odintsev V.N. Development of geomechanics of highly compressed rocks and rock masses in Russia. *Geohazard Mechanics*, 2025, vol. 3, no. 1, pp. 42-58. DOI: 10.1016/j.ghm.2025.02.002
2. Keilis-Borok V.I. Fundamentals of earthquake prediction: four paradigms. *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 1-36. DOI: 10.1007/978-3-662-05298-3_1
3. Wang C. Evolution, monitoring and predicting models of rockburst: Precursor information for rock failure. Springer Nature, 2018, 188 p. DOI: 10.1007/978-981-10-7548-3
4. Bogomolov L.M., Sycheva N.A. Prognoz zemletriasenii v XXI veke: predystoriia i kontseptsii, predvestniki i problemy [Earthquake Predictions in XXI Century: Prehistory and Concepts, Precursors and Problems]. *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 145-182. DOI: 10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182
5. Song D. et al. Rockburst evolutionary process and energy dissipation characteristics. Singapore: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-981-13-6279-8
6.Wang J. et al. Numerical modeling for rockbursts: A state-of-the-art review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 457-478. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.011
7. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti «Polozhenie po bezopasnomu vedeniiu gornykh rabot na mestorozhdeniiakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram» (utv. prikazom Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 2 December 2013. No. 576) [Federal Norms and Rules in Industrial Safety "Regulations on the Safe Conduct of Mining Operations at Deposits Prone to and Hazardous of Rock Bursts" (approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated December 2, 2013, No. 576)]. Moscow: Nedra, 2013, 78 p.
8. Kozyrev A.A. et al. Ukazaniia po bezopasnomu vedeniiu gornykh rabot na mestorozhdeniiakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (mestorozhdenie Olenii ruchei) [Guidelines for the safe conduct of mining operations at deposits prone to and hazardous for rock bursts (Oleniy Ruchey deposit)], 2015.
9. Rasskazov I.Iu. Kontrol' i upravlenie gornym davleniem na rudnikakh Dal'nevostochnogo regiona [Monitoring and control of rock pressure in mines of the Far Eastern region]. Moscow: Gornaia kniga, 2008, 329 p.
10. Batugin A.S., Odintsev V.N., Litszian Iui. Geodinamicheskie iavleniia i triggernyi effekt v razrushenii massiva porod na shakhte Khuafen [Geodynamic phenomena and trigger effect in the destruction of rock mass at the Huafeng mine]. *Triggernye effekty v geosistemakh. Materialy IY Vserossiiskoi konferentsii*. Moscow: GEOS, 2017, 18 p.
11. Iofis M.A., Odintsev V.N., Miletenko N.A., Mitishova N.A. Osobennosti gidrogeomekhanicheskogo sostoianiia massiva pri podrabotke vodnykh ob"ektov [Features of the hydrogeomechanical state of the massif during the development of water bodies]. *Kombinirovannaia geotekhnologiia: resursosberezhenie i energoeffektivnost'. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Magnitogorsk, 2017, pp. 168-171.
12. Lasocki S., Orlecka-Sicora B., Mutke G. at al. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*. Santiago, Chile, 2017, pp. 316-324.
13. Seedsman R.W. Application of rock-burst concepts to understanding the sudden collapse of ribs in coal mines. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*. Santiago, Chile, 2017, pp. 297-303.
14. Van Aswegen G. Seismic sources and rockburst damage in South Africa and Chile. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*. Santiago, Chile, 2017, pp. 72-86.
15. Durrheim R.J. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South African: 100 years of research. *Extracting the Science: a century of mining research*, 2010, pp. 156-171.
16. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines - A case study of Sanshandao gold mine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 204-211. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.11.002
17. Ortlepp W.D., Stacey T.R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, vol. 9, no. 1, pp. 59-65. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90010-8
18. Stewart R.A. et al. The nature of a deformation zone and fault rock related to a recent rockburst at Western Deep Levels Gold Mine, Witwatersrand Basin, South Africa. *Tectonophysics*, 2001, vol. 337, no. 3-4, pp. 173-190. DOI: 10.1016/S0040-1951(01)00028-2
19. Zhou Y., Wang T. PNN-based rock burst prediction model and its applications. *Earth Sciences Research Journal*, 2017, vol. 21, no. 3. pp. 141-146. DOI: 10.15446/esrj.v21n3.65216
20. Yang Z., Liu Ch., Zhu H., Wu J. Prediction and integrated prevention technology of dynamic disasters combined rock burst and gas outburst in deep mine. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, no. 22 (2), pp. 477-488. DOI: 10.1038/s41598-025-91518-7
21. Vardar O. et al. A semi-quantitative coal burst risk classification system. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, vol. 28, no. 5, pp. 721-727. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.08.001
22. Iannacchione A.T., Tadolini S.C. Occurrence, predication, and control of coal burst events in the US. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 39-46. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.11.008
23. Chen Y. et al. Rockburst precursors and the dynamic failure mechanism of the deep tunnel: A review. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 22, 7548 p. DOI: 10.3390/en14227548
24. Ortlepp W.D., Stacey T.R. Rock burst mechanisms in tunnels and shafts. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 1994, no. 59, pp. 59-65. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90010-8
25. Feng X.T., Xiao Y.X., Feng G.L. et al. Study on the development process of rockbursts. *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2019, no. 38, pp. 1-25. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0103
26. Wang J.-A., Park H. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2001, no. 16, pp. 49-57. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00030-X
27. Tao Z.Y. Support design of tunnels subjected to rockbursting. *ISRM International Symposium*. Madrid, Spain, 1988. DOI: 10.1016/0148-9062(89)91954-2
28. Kidybi´nski A. Bursting liability indices of coal. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Géoméch. Abstr.*, 1981, no. 18, pp. 295-304. DOI: 10.1016/0148-9062(81)91194-3
29. Chen B.-R., Feng X.-T., Li Q.-P. et al. Rock Burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at jinping II hydropower station, China. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, no. 48, pp. 289-303. DOI: 10.1007/s00603-013-0524-2
30. Altindag R. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency. *Rock mechanics and rock engineering*, 2010, vol. 43, no. 3, pp. 361-370. DOI: 10.1007/s00603-009-0057-x
31. Cook N.G.W. The failure of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1965, vol. 2, no. 4, pp. 389-403. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90004-5
32. Tang L., Xia K.W. Seismological method for prediction of areal rockbursts in deep mine with seismic source mechanism and unstable failure theory. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 947-953. DOI: 10.1007/s11771-010-0582-5
33. Linkov A.M. Rockbursts and the instability of rock masses. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 1996, vol. 33, no. 7, pp. 727-732. DOI: 10.1016/0148-9062(96)00021-6
34. Xie H., Pariseau W.G. Fractal character and mechanism of rock bursts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, vol. 30, no. 4, pp. 343-350. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91718-X

35. Kaise P.K. Canadian rockburst support handbook. Geomechanics Research Centre: Sudbury, CO. Canada, 1996.
36. Huang R.Q., Wang X.N. Analysis of dynamic disturbance on rock burst. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999, vol. 57, no. 3, pp. 281-284. DOI: 10.1007/s100640050046
37. He M. et al. Rockburst laboratory tests database - application of data mining techniques. *Engineering Geology*, 2015, vol. 185, pp. 116-130. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.12.008
38. Yan P. et al. Mitigation of rock burst events by blasting techniques during deep-tunnel excavation. *Engineering Geology*, 2015, vol. 188, pp. 126-136. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.01.011
39. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskay E., Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 1996, no. 146 (2), pp. 253-263. DOI: 10.1007/BF00876492
40. Guzev M.A., Odintsev V.N., Makarov V.V. Printsipy postroeniia kontinual'noi modeli ierarkhicheski-blochnoi geosredy [Constructing continuos model of hierarchical block geomedium]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. Novosibirsk: Institut gornogo dela imeni N.A. Chinakala Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 42-52. DOI: 10.15372/FPVGN2021080106
41. Makarov V.V., Golosov A.M. Kompleksnye predvestniki geodinamicheskikh iavlenii razrusheniia gornykh porod i tekhnologiia ikh registratsii [Complex precursors of geodynamic phenomena of rock destruction and the technology of their registration]. *Problemy geomekhaniki sil'no szhatykh gornykh porod i massivov. XIII Mezhdunarodnaia rossiisko-kitaiskaia konferentsiia po geomekhanike bol'shikh glubin, 28 July - 1 August 2025*. Vladivostok: Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet, 2025, pp. 54-56. DOI: 10.24866/7444-5951-2.
42. Cai M., Kaiser P.K., Martin C.D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, vol. 38, no. 8, pp. 1135-1145. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00068-5
43. Zhao T.-B., Guo W.-Y., Tan Y.-L. et al. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800 m. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 1539-1564. DOI: 10.1007/s00603-018-1411-7
44. Kaiser P.K., Cai M. Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 215-227. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2012.00215
45. Martini C.D., Read R.S., Martino J.B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065-1073. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)90200-8
46. Gol'din S.V. Makro- i mezostruktury ochagovoi oblasti zemletriaseniia [Macro- and mesostructures of the earthquake focal zone]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 5-14.
47. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V. et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 1991, vol. 350, no. 6313, pp. 39-42. DOI: 10.1038/350039a0
48. Makarov V.V. et al. Mesocracking structures of the “source type” in highly stressed rocks. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 403-411. DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_28_Makarov
49. Makarov V.V., Golosov A.M., Morkovin A.V. Sposob opredeleniia napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia obraztsov gornykh porod [Method for determining the stress-strain state of rock samples]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2020143874 (2021).
50. Rice J.R. The mechanics of earthquake rupture. *Providence: Division of Engineering*, 1979, vol. 720, 721 p.
51. Makarov V.V., Guzev M.A., Odintsev V.N. Geomekhanika sil'no szhatykh gornykh porod i massivov. Istoki, metody, osnovnye rezul'taty [Geomechanics of Highly Compressed Rocks and Massifs: Origins, Methods, and Main Results]. *Nedropol'zovanie*, 2026, no. 1.
52. Shishmarev V.Iu. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems]. 2nd ed. Moscow: Iurait, 2025, 289 p.
53. Golosov A.M., Makarov V.V. Tekhnologiia effektivnoi registratsii predvestnikov geodinamicheskikh iavlenii razrusheniia gornykh porod na osnove metodov mashinnogo obucheniia [A technology for efficient registration of precursors of geodynamic rock destruction phenomena based on machine learning methods]. *Problemy geomekhaniki sil'no szhatykh gornykh porod i massivov. XIII Mezhdunarodnaia rossiisko-kitaiskaia konferentsiia po geomekhanike bol'shikh glubin, 28 July - 1 August 2025*. Vladivostok: Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet, 2025, pp. 115-118. DOI: 10.24866/7444-5951-2

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.