



Новый подход к снижению риска крупных техногенных землетрясений, основанный на результатах микросейсмического мониторинга

А.Н. Беседина, Г.Г. Кочарян ✉

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ gevorgkidg@mail.ru

Резюме: В основе предлагаемого подхода лежит известное из лабораторных экспериментов положение о том, что текущие фрикционные свойства поверхности скольжения отражаются и на очаговых параметрах отдельных индуцированных микросейсмических событий, и в характеристиках сейсмоакустического шума, источники которого локализованы в зоне разлома. Методика основана на оценке величины приведенной сейсмической энергии, что позволяет судить о вероятности реализации накопленной в массиве упругой энергии в виде динамических событий. На примере данных, зарегистрированных на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии, проведена оценка очаговых параметров сейсмических событий, индуцированных взрывами. На основе полученных результатов показано, что на шахте «КМА–руда» зарегистрирован рой инициированных массовым взрывом микроземлетрясений с низкой скоростью распространения разрыва. Показана перспективность применения методов машинного обучения для определения времени и магнитуды готовящегося динамического события в режиме реального времени на основе данных лабораторных экспериментов с АЭ. Полученные результаты могут быть использованы для краткосрочного прогноза крупных динамических событий в условиях работающего рудника. Проведенный анализ показал перспективность создания новых методов мониторинга напряженных массивов при ведении горных работ с целью предупреждения инициирования крупных землетрясений, связанных с динамическим смещением по тектоническим разломам.

Ключевые слова: горные работы, горные удары, техногенные землетрясения, сейсмический мониторинг, сейсмическая энергия, скалярный сейсмический момент, удароопасность массива

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект №22-17-00204 (Кочарян Г. Г.) и госзадания №122032900172-5 (Беседина А.Н.).

Для цитирования: Беседина А.Н., Кочарян Г.Г. Новый подход к снижению риска крупных техногенных землетрясений, основанный на результатах микросейсмического мониторинга. *Горная промышленность*. 2023;(S1):28–34. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-28-34>

A new approach to reducing the risk of large-scale man-induced earthquakes based on the results of microseismic monitoring

A.N. Besedina, G.G. Kocharyan ✉

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ gevorgkidg@mail.ru

Abstract: The proposed approach is based on the assumption, known from laboratory experiments, that the current frictional properties of the sliding surface are reflected both in the source parameters of the individual induced microseismic events and in the characteristics of seismoacoustic noise, the sources of which are localized in the fault zone. The technique is based on an estimate of the scaled seismic energy, which makes it possible to judge the probability of the realization of the elastic energy accumulated in the rock mass in the form of dynamic events. The article estimates the source parameters of seismic events induced by blasting using the example of data recorded at the Korobkovskoe iron ore deposit of the Kursk magnetic anomaly. On the basis of the results obtained, it is shown that a swarm of induced micro-earthquakes with a low rupture propagation velocity was registered at the KMA-ruda mine. The prospects of using machine learning methods to determine the time and magnitude of an impending dynamic event in real time based on the data of laboratory experiments with AE are shown. The results obtained can be used for short-term forecasting of large dynamic events in conditions of an operating mine. The analysis carried out showed that creation of new methods for monitoring stressed rock masses during mining operations seems to be a promising solution to prevent initiation of large earthquakes associated with dynamic displacement along the tectonic faults.

Keywords: mining, rock bursts, man-induced earthquakes, seismic monitoring, seismic energy, scalar seismic moment, rockburst hazard, machine learning



Acknowledgments: This research was financially supported by the Russian Science Foundation project No.22-17-00204 (Kocharyan G.G.) and State Assignment No.122032900172-5 (Besedina A.N.).

For citation: Besedina A.N., Kocharyan G.G. A new approach to reducing the risk of large-scale man-induced earthquakes based on the results of microseismic monitoring. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):28–34. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-28-34>

Введение

Сейсмичности, связанной с ведением горных работ в напряженных массивах горных пород, уделяется значительное внимание (см., напр., [1–3] и др.). Землетрясения значительной магнитуды, вплоть до $M_L \sim 5,5$ – $5,8$, происходили во многих регионах интенсивной добычи полезных ископаемых в России, Китае, США, ЮАР и т.д. (см., напр., [2; 4] и др.). В литературе описано несколько сотен землетрясений с $M > 2,8$, связанных с добычей твердых полезных ископаемых на рудниках и карьерах [2]. При этом многие крупные землетрясения, инициированные горными работами, связаны с подвижками по тектоническим разломам (см., напр., [5–8] и др.). Такие события приводят, как правило, к тяжелым повреждениям близлежащих горных выработок, а при наиболее крупных землетрясениях к разрушению всей инфраструктуры рудника и повреждениям зданий на поверхности. Важно подчеркнуть, что очаги сильных техногенных землетрясений независимо от того, какой именно вид антропогенной нагрузки (горные работы, добыча углеводородного сырья, заполнение водохранилищ и т.д.) послужил триггером, могут располагаться не только в непосредственной близости от участка ведения горных работ, но и на значительном удалении, вплоть до глубин в 5–10 км (см., напр., [1; 2; 9] и др.).

Интенсивно развивающиеся сети наблюдений за шахтной сейсмичностью направлены прежде всего на предупреждение горных ударов, внезапных выбросов породы в окрестности фронта ведения работ (см., напр., [3; 10; 11] и др.). Успешно применяемые для этих целей методики не всегда пригодны для контроля подготовки наиболее разрушительных событий, связанных с инициированными подвижками по разломам. Создание новых принципов диагностики потенциально опасных участков ведения горных работ в окрестности разломных зон предполагает развитие более детальных представлений о закономерностях формирования различных режимов скольжения по границам, разделяющим блоки горной породы на разном масштабном уровне, и создание новых подходов к интерпретации микросейсмической информации.

В настоящей статье кратко изложены основы развиваемого в ИДГ РАН нового подхода к снижению риска крупных техногенных землетрясений, основанного на результатах микросейсмического мониторинга. В основе научной концепции развиваемого подхода лежат новые представления о закономерностях и условиях реализации различных режимов скольжения по разломам – от крипа до динамического срыва. Асейсмические сдвиги и так называемые «низкочастотные землетрясения» происходят в коре по всей глубине, а свидетельства событий медленного скольжения проявляются в геологической структуре разломов, поднятых с разных глубин [12]. Реализация разных режимов скольжения определяется фрикционными свойствами геоматериала, из которого сложена зона локализации скольжения, Р-Т условиями, геометрией зоны скольжения. Эти свойства, как правило, недоступны для прямого наблюдения.

И напряженное состояние, и фрикционные свойства по-

тенциальных зон скольжения, особенно на относительно небольших глубинах, могут меняться под действием экзогенных факторов – извлечения больших объемов горной породы, сезонных вариаций обводненности массива и т.д. [1; 2; 9; 13; 14].

Например, фактор изменения порового давления часто рассматривается в качестве одного из основных триггеров техногенной сейсмичности. В самом деле, ясно, что увеличение порового/трещинного давления снижает эффективное нормальное давление и, соответственно, фрикционное сопротивление в разломе, способствуя возникновению проскальзывания. Подчеркнем, однако, что такое скольжение не обязательно должно быть достаточно быстрым, чтобы излучать интенсивные сейсмические колебания, но может быть медленным и асейсмичным. В самом деле, хорошо известно, что существует критический минимальный размер L_c так называемой зоны нуклеации участка разлома или трещины, на котором может быть инициировано нестабильное динамическое скольжение [15; 16]. При этом величина L_c обратно пропорциональна эффективному нормальному напряжению и, следовательно, увеличивается с ростом порового давления, способствуя стабильному, асейсмичному проскальзыванию. Этот стабилизирующий эффект увеличения давления жидкости часто не принимается во внимание при проведении оценок.

В основе предлагаемого подхода лежит известное из лабораторных экспериментов положение, отражающее тот факт, что текущие фрикционные свойства поверхности скольжения отражаются и на очаговых параметрах отдельных индуцированных микросейсмических событий, и в характеристиках сейсмоакустического шума, источники которого локализованы в зоне разлома.

В последующих разделах изложены основы метода, приведены примеры полученных «in situ» результатов и обоснована возможность получения данных, пригодных для краткосрочного прогноза крупных динамических событий, в условиях работающего рудника.

Методы

«In situ» могут быть выделены как нормальные, так и «медленные» землетрясения. Для нормальных землетрясений, как правило, характерны значения скорости распространения разрыва, близкие к скорости распространения релеевской волны или несколько ниже. В то время как для «медленных» землетрясений скорость распространения разрыва составляет 0,01–1 км/с [16]. Такие события могут возникать в виде роев сейсмических событий при медленном фрикционном скольжении по разлому [17]. При этом для событий различного типа при одном и том же реализованном сейсмическом моменте M_0 значения излученной сейсмической энергии E_s могут отличаться на несколько порядков [16; 17].

В основе методики лежит оценка величины приведенной сейсмической энергии $e = E_s / M_0$ и, соответственно, скорости распространения разрыва. Основываясь на этом параметре, можно судить о вероятности реализации накопленной в массиве упругой энергии в виде динамических



событий. Оценка влияния характеристик вмещающего массива и заполнителя трещин на масштабные соотношения и скорость распространения разрыва использовалась при изучении состояния участка разломной зоны с точки зрения его сейсмогенности.

Исследование выполнялось путем анализа параметров сейсмических событий, индуцированных взрывами, проводимыми при разработке прочных кварцитов Коробковского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии (КМА) в тектонически стабильном районе Восточно-Европейской платформы. Коробковское месторождение характеризуется относительно небольшой глубиной разработки (около 300 м от свободной поверхности) при существенном превышении величины горизонтальных напряжений над вертикальными [18; 19].

Для проведения сейсмического мониторинга в шахте им. Губкина «Комбината КМА–руда» была размещена временная сейсмическая группа на глубине 300 м, состоящая из 4–6 измерительных точек Т1–Т6 (конфигурация меняется в зависимости от места проведения взрыва), которые были оборудованы акселерометрами Briel&Kjaer 8306 с рабочим диапазоном частот от 0,08 Гц до 1 кГц. Акселерометры располагались на вертикальных стенках выработки: однокомпонентные датчики в измерительных точках Т1–Т4, Т6 – перпендикулярно стенке выработки. Измерительная точка Т5 была дополнена до трехкомпонентной. Регистрация велась на 14-разрядное АЦП Е14-440 L-Card с частотой дискретизации 10 кГц, чувствительность измерительного канала составляла 7.8 (мкм/с²)/отсчет. На отдельный канал велась запись временной метки для контроля частоты опроса АЦП. Измерения осуществлялись в течение 10–16 ч в период прекращения горных работ, которые останавливаются примерно за 2 ч до проведения взрыва и возобновляются через сутки. В работе проводился анализ сейсмических событий, индуцированных взрывом, сам массовый взрыв не является предметом исследования.

Для анализа использовались данные, зарегистрированные при проведении двух массовых взрывов 06.07.2019 г. (1) и 24.10.2020 г. (2). При взрыве 1 (06.07.2019 г.) сейсмическая группа включала датчики Т1–Т4, при взрыве 2 (24.10.2020 г.) – Т1–Т2 и Т5–Т6. Детальный анализ сейсмических событий при взрыве 1 описан в [17]. Расположение датчиков, взрывная камера и очаги зарегистрированных событий показаны на рис. 1. Локация сейсмических событий, индуцированных взрывом, проводилась по вступлениям Р-волн, а также с помощью поляризационного анализа при наличии трехкомпонентной измерительной точки. Очаги практически всех зарегистрированных событий находятся внутри области с уровнем динамических деформаций от взрывов $\varepsilon > 10^{-6}$. Стоит отметить, что при взрыве 1 слабые сейсмические события были зарегистрированы в непосредственной близости от разломной зоны в отличие от взрыва 2, когда сейсмические события были зарегистрированы на значительном удалении от разлома.

Для зарегистрированных событий определялись очаговые параметры: сейсмический момент M_0 , угловая частота f_0 и сейсмическая энергия E_s . Скалярный сейсмический момент может быть рассчитан согласно соотношению [20]:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho C^3 R\Omega_0}{F_c R_c S_c} \quad (1)$$

где ρ – плотность массива ($\rho=3400$ кг/м³); C – скорость распространения волн; R – расстояние от источника до точки наблюдения; Ω_0 – амплитуда «полки» в низкочастотной части спектра смещения; F_c – коэффициент, учитываю-

щий направленность излучения; R_c – коэффициент, определяемый углом выхода луча на свободную поверхность; S_c – стационарная поправка. Если механизм источника не определен, оценку сейсмического момента можно производить по среднеквадратичному значению коэффициента, учитывающего направленность излучения, рассчитанному исходя из сферической формы источника, используя значения $F_\alpha = 0,52$ и $F_\beta = 0,63$ [20]. Следуя [20], можно пренебречь стационарной поправкой и коэффициентом, который учитывает угол выхода луча на свободную поверхность ($R_c=1$), для датчиков, расположенных в подземных выработках.

Угловая частота f_0 определялась согласно модели Брюна [21], для которой спектр смещения описывается функцией:

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1+f^2/f_0^2} \quad (2)$$

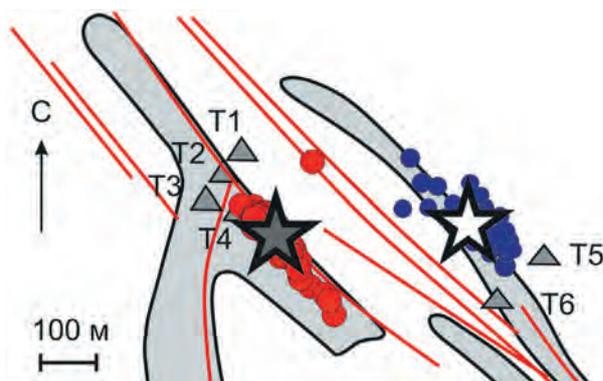


Рис. 1
Исследуемый участок Коробковского железорудного месторождения. Сплошными красными линиями отмечены зоны тектонических нарушений. Серым цветом выделены рудные поля. Треугольниками Т1–Т6 обозначены точки установки акселерометров. Серой звездой отмечена область взрыва, произведенного 06.07.2019 г. (взрыв 1), белой – 24.10.2020 г. (взрыв 2). Красные значки соответствуют сейсмическим событиям, зарегистрированным после взрыва 1, синие значки – после взрыва 2

Fig. 1
The investigated area of the Korobkovskoe iron ore deposit. Red lines mark zones of tectonic faults. Ore fields are highlighted in grey. Triangles T1–T6 indicate the installation points of the accelerometers. The gray star marks the area of the blast made on July 6, 2019 (Blast 1), the white one marks the blast carried out on October 24, 2020 (Blast 2). Red signs correspond to the seismic events registered after Blast 1, blue signs correspond to the seismic events registered after Blast 2

Излученная сейсмическая энергия, оценивалась с помощью интегрирования спектра скорости согласно соотношению:

$$E_s = 4\pi\rho C \frac{\sum_n J_n R_n^2}{n} \quad (3)$$

где n – количество точек измерения; R_n – расстояние между источником и n -й измерительной станцией; J_n – поток энергии, определяемый через модуль спектра скорости $|V(f)|$, согласно соотношению [20] (множитель 3 использовался при оценке потока энергии по однокомпонентной записи):

$$J_n = 3 \times 2 \int_{f_1}^{f_2} |V(f)|^2 df \quad (4)$$

Для оценки величины сброса напряжения в массиве использовалось соотношение для модели кругового разлома R. Madariaga [22]:



$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} M_0 \left(\frac{2\pi f_0}{K C_\beta} \right)^3, \quad (5)$$

где K принимает значения K_α и K_β для Р- и S-волн соответственно. Полученные значения дают хорошую сходимость с результатами наблюдений в шахтах [20]. Если механизм очага не определен, то могут быть использованы средние значения коэффициентов K_α и K_β [20; 23].

Кажущееся напряжение (т. е. некоторая условная часть напряжений на разломе, работа которой не расходуется на разрушение или тепловые потери) рассчитывалось по обычному соотношению:

$$\sigma_a = \mu \frac{E_s}{M_0}, \quad (6)$$

где μ – модуль сдвига массива горных пород.

Отношение кажущегося напряжения σ_a к величине сброса напряжения $\Delta\sigma$ можно использовать для вычисления скорости распространения разрыва V_r через параметр излучательной эффективности [16]:

$$\eta_R = \frac{E_s}{E_s + E_G} = 2 \frac{\sigma_a}{\Delta\sigma}, \quad (7)$$

где E_G – величина энергии, идущей на разрушение контакта (трещинообразование), а E_s – излученная сейсмическая энергия. Для первой сдвиговой моды и для трещин отрыва справедливы соотношения [16]:

$$\eta_R = 1 - \frac{1 - V_r / C_R}{\sqrt{1 - V_r / C_S}} \quad (8)$$

и

$$\eta_R = \frac{V_r}{C_R} \quad (9)$$

соответственно.

Результаты

Проведенный анализ сейсмических данных, зарегистрированных в районе проведения работ на шахте им. Губкина «Комбината КМА–руда», позволил определить основные характеристики слабых сейсмических сигналов, которые были индуцированы взрывными работами. Оценка полученных параметров сейсмических событий в совокупности с исследованием масштабных соотношений позволила достаточно детально изучить процессы, происходящие в очаге.

Для модели Брюна проведена оценка моментных магнитуд M_w выделенных событий в диапазоне от $-2,4$ до $-1,7$ с угловой частотой от 120 до 760 Гц (рис. 2). Полученные значения магнитуд и угловых частот соответствуют, согласно модели [22], радиусам очага в первые метры. Величина сброса напряжения варьируется от 0,002 до 1 МПа (см. рис. 2). Величина рассчитанной сейсмической энергии варьируется от 10^{-3} до 15 Дж при изменении сейсмического момента примерно на два порядка от 10^5 до 10^7 Н·м, что соответствует вариациям кажущегося напряжения от 0,0003 до 0,1 МПа (рис. 3). Очевидно, что при сопоставимых значениях сейсмического момента зарегистрированных событий значения сейсмической энергии событий после взрыва 2 в основном превышают значения энергии событий после взрыва 1, что также находит отражение и в величине приведенной сейсмической энергии $e = E_s / M_0$.

При проведении измерений в данной постановке опре-

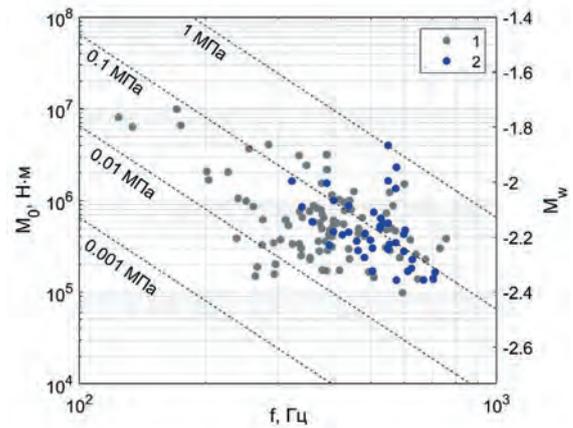


Рис. 2 Соотношение между скалярным сейсмическим моментом M_0 и угловой частотой источника f_0 для зарегистрированных слабых сейсмических событий. Значения постоянного сброса напряжения рассчитаны для модели источника [22]. Значки разного цвета соответствуют взрыву 1 и 2

Fig. 2 The relationship between the scalar seismic moment M_0 and the corner frequency f_0 for the recorded weak seismic events. The values of the constant stress drop are calculated for the source model [22]. Signs of different colors correspond to Blast 1 and Blast 2

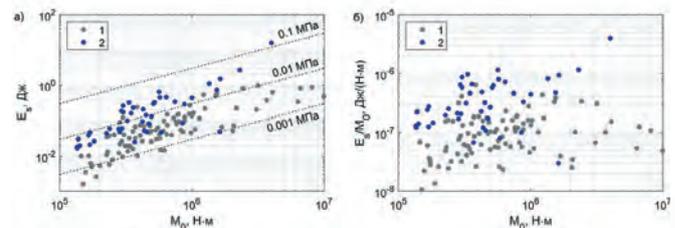


Рис. 3 Сейсмическая энергия, излученная индуцированными событиями разного размера в зависимости от величины сейсмического момента: а – излученная сейсмическая энергия; б – приведенная сейсмическая энергия E_s / M_0 . Уровни постоянного кажущегося напряжения σ_a показаны пунктирными линиями. Значки разного цвета соответствуют взрывам 1 и 2

Fig. 3 Seismic energy radiated by the induced events of different sizes depending on the seismic moment: а) radiated seismic energy; б) scaled seismic energy E_s / M_0 . The levels of constant apparent stress σ_a are shown by dotted lines. Signs of different colors correspond to Blast 1 and Blast 2

делить тип трещины, соответствующей событию, не представляется возможным. В этом случае проводились оценки медианных значений скорости распространения разрыва V_r для всего ансамбля событий в двух вариантах. В первом случае предполагалось, что все события являются трещинами сдвига, а во втором – трещинами отрыва. Полученные значения скорости V_r для двух взрывов приведены на рис. 4. Медианные значения $V_r / C_s = 0,19-0,31$ для взрыва 1 и $V_r / C_s = 0,22-0,36$ для взрыва 2.

Обсуждение

Результаты, полученные на Коробковском месторождении, дополняют мировую базу данных шахтной сейсмичности, демонстрируя при этом выраженные особенности. Так, средняя величина приведенной сейсмической энергии для большинства зарегистрированных событий заметно ниже, чем при регистрации микросейсмических событий

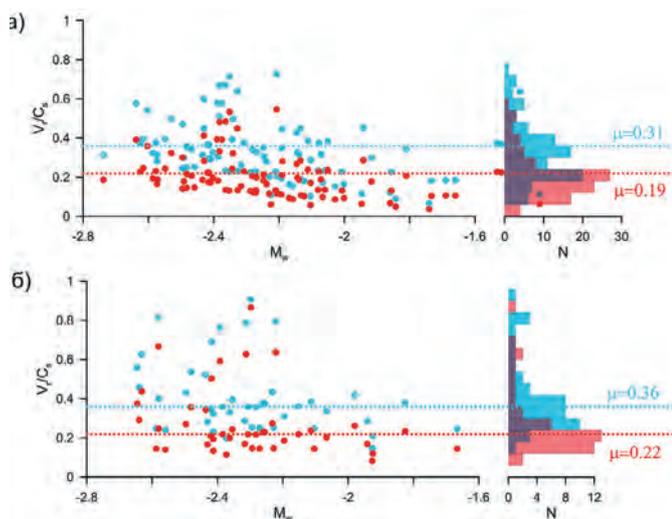


Рис. 4
Значение скорости распространения разрыва, приведенное к скорости распространения поперечных волн V_r / C_s ; а – взрыв 1; б – взрыв 2. Голубым показаны значения в предположении, что все события – трещины сдвига, красным – трещины отрыва. Пунктиром показана медиана

Fig. 4
The rupture propagation velocity scaled to the velocity of S-waves: (a) Blast 1, (b) Blast 2. The values in blue are based on the assumption that all the events are shear fractures, in red values are given for the tensile fractures. The dotted line shows the median

на многих горнодобывающих предприятиях. В работах [16; 17] собраны данные для таких объектов, как Рудна (Польша), Таштогольский рудник (Россия), Pyhäsaalmi (Финляндия), Манитоба и Strathcona (Канада), глубокие золотодобывающие рудники Южной Африки и др. Там же приведены ссылки на оригинальные работы. Согласно этим данным в большинстве случаев величина отношения E_s / M_0 находится в диапазоне 10^{-6} – 10^{-4} , что значительно превышает значения, полученные для Коробковского месторождения (рис. 3, б). Почти столь же низкие, как в нашем случае, значения приведенной энергии имеют микросейсмичность, зарегистрированная при бурении сверхглубокой скважины КТВ (Германия), и отдельные события на других объектах [17].

Значения скоростей распространения разрыва для индуцированных микрособытий на шахте «КМА–руда» (рис. 4) намного ниже величин, характерных для динамических подвижек $V_r < \sim 0.8C_s$, что позволяет идентифицировать их как рой сейсмических событий с низкой излучательной эффективностью или «медленных» микроземлетрясений. Заметим, что для событий, приуроченных к зоне разлома, отмечены более низкие медианные значения скорости распространения разрыва по сравнению с событиями, очаги которых расположены на удалении от разлома, что свидетельствует о влиянии структурных и механических свойств локального участка массива на параметры индуцированной сейсмичности.

Таким образом, можно заключить, что анализ очаговых параметров слабой сейсмичности может дать важную дополнительную информацию о склонности участка к динамическим подвижкам по разломам и крупным тектоническим трещинам.

Определенную проблему при внедрении данного подхода представляет то обстоятельство, что в условиях работающего предприятия получить ряд непрерывных наблюдений, пригодных для идентификации слабых сейсмических событий, их локации и определения очаговых параметров,

часто бывает затруднительно из-за высокого уровня шума, связанного с проведением горных работ. В этих условиях помощь в получении результата может оказать анализ данных с применением методов машинного обучения, искусственного интеллекта и других передовых приемов анализа многомерных рядов данных. Уже первые опыты применения новых подходов к обработке лабораторных и полевых данных продемонстрировали потенциальную возможность построения успешных прогнозов развития деформационного процесса на основе ограниченного ряда наблюдений [12; 24].

В нашей недавней статье [24] приведен пример применения алгоритма машинного обучения «случайный лес» для анализа данных акустической эмиссии, излучаемой при скольжении блока по лабораторному разлому. В экспериментах были реализованы разные режимы скольжения – регулярный режим, состоящий из периодических динамических срывов близкой амплитуды типа «стик-слип», и нерегулярный, при котором происходили как динамические события разной интенсивности, так и медленные подвижки.

Обучение алгоритма проводилось на данных двух экспериментов, в которых были реализованы регулярный и нерегулярный режимы скольжения. На этом этапе устанавливается связь между входными статистическими параметрами акустической эмиссии и каталога событий и выходными значениями относительной скорости смещения блоков и/или времени до момента динамического события.

На рис. 5 показан результат применения алгоритма восстановления скорости скольжения блока и времени до динамического срыва при регулярном режиме скольжения. Прогноз макроскопического движения строился по данным регистрации акустического сигнала от последовательности событий скольжения, которые модель

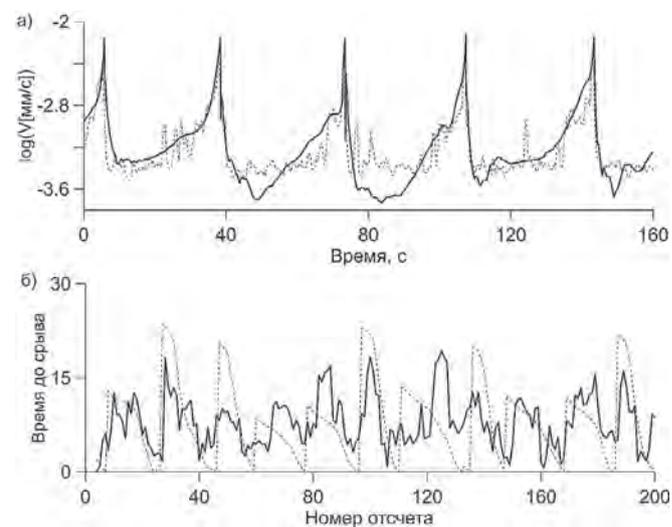


Рис. 5
Определение макроскопических параметров скольжения блока в лабораторном эксперименте по данным регистрации акустической эмиссии на основе алгоритма «случайный лес». По [24] а – определение скорости скольжения блока; б – результаты определения времени до динамического события. Пунктирная линия – реальные значения скорости, сплошная линия – значения, предсказанные моделью

Fig. 5
Determination of the macroscopic parameters of block sliding in a laboratory experiment based on acoustic emission data according to the “random forest” algorithm. By [24] a) determination of the block sliding velocity; b) results of determining the time to the dynamic event. The dotted line is the actual velocity, the solid line is the values predicted by the model



никогда ранее не «видела». При определении времени до динамического срыва был использован сформированный каталог импульсов АЭ. Статистические параметры, которые характеризуют поток АЭ, сопровождающий процесс деформирования, были рассчитаны в скользящем окне шириной 100 импульсов с шагом 50 импульсов. Таким образом, в проведенных экспериментах обучение алгоритма на относительно коротких временных интервалах позволяет осуществлять успешный прогноз поведения системы. В деталях процесс обработки описан в [24].

Для нерегулярного режима скольжения результаты менее надежны, однако время до наиболее крупных событий и их амплитуда также прогнозируются довольно успешно [24].

Заключение

При проведении сейсмического мониторинга на шахте «КМА–руда» зарегистрирован рой инициированных массовым взрывом микроземлетрясений с низкой скоростью распространения разрыва.

Микросейсмические колебания, индуцированные горными работами, являются источником информации о напряженно-деформированном состоянии локального участка разлома. Кроме того, они, вероятно, содержат сведения и о фрикционных характеристиках породы, которые определяют возможный режим деформирования нарушения сплошности – динамический срыв или асейсмическое скольжение.

Использование современных методов обработки характеристик АЭ позволяет в лабораторных экспериментах с удовлетворительной точностью в режиме реального времени определять время и магнитуду готовящегося динамического события.

Приведенные результаты демонстрируют перспективность создания новых методов мониторинга напряженных массивов при ведении горных работ с целью предупреждения инициирования крупных землетрясений, связанных с динамическим смещением по тектоническим разломам.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. *Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная*. М.: ИДГ РАН; 2015. 364 с.
2. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
3. Kozыrev A.A., Kasparyan E.V., Fedotova Iu.V. Monitoring of mining-induced seismicity in the Khibiny rock massif. In: *Rock Dynamics – Experiments, Theories and Applications. Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3), June 26–27, 2018, Trondheim, Norway*. London: CRC Press; 2018, pp. 469–474.
4. Adushkin V.V. Tectonic earthquakes of anthropogenic origin. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016;52(2):173–194. <https://doi.org/10.1134/S1069351316020014>
5. Heesakkers V., Murphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth, part I: structure and rupture of the Pretorius fault, TauTona Mine, South Africa. *Pure and Applied Geophysics*. 2011;168(12):2395–2425. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0354-7>
6. Sainoki A., Mitri H.S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;66:19–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.12.003>
7. Bai J., Dou L., Li J., Zhou K., Cao J., Kan J. Mechanism of Coal Burst Triggered by Mining-Induced Fault Slip Under High-Stress Conditions: A Case Study. *Frontiers of Earth Science*. 2022;10:884974. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.884974>
8. Kremenetskaya E.O., Triapitsin V.M. Induced seismicity in the Khibiny massif (Kola Peninsula). *Pure and Applied Geophysics*. 1995;145(1):29–37. <https://doi.org/10.1007/BF00879481>
9. Kocharyan G., Qi C., Kishkina S., Kulikov V. Potential triggers for large earthquakes in open pit mines: a case study from Kuzbass, Siberia. *Deep Underground Science and Engineering*. 2022;1(2):101–115. <https://doi.org/10.1002/dug.2.12028>
10. Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит». *Горный журнал*. 2014;(10):42–46. Режим доступа: <https://rudmet.ru/journal/1354/article/23221/>
11. Козырев А.А., Онуприенко В.С., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях. *Горный журнал*. 2020;(9):19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
12. Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса. *Физика Земли*. 2021;(4):3–41. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>
13. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*. 2022;(6):95–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
14. Козырев А.А., Жукова С.А., Батугин А.С. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин. *Горный журнал*. 2021;(1):31–36. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06>
15. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws. *Nature*. 1998;391:37–42. <https://doi.org/10.1038/34097>
16. Кочарян Г.Г. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС; 2016. 424 с.
17. Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Параметры источников роя микросейсмических событий, инициированных взрывом на Коробковском железорудном месторождении. *Физика Земли*. 2021;(3):63–81. <https://doi.org/10.31857/S0002333721030030>
18. Григорьев А.М. *Геомеханическое обоснование подземной разработки железорудных месторождений КМА под обводненной толщей пород: дис. ... канд. техн. наук*. Белгород; 2008. 148 с.
19. Кейлис-Борок В.И. *Исследование механизма землетрясений*. М.: Изд-во АН СССР; 1957. 148 с.
20. Gibowicz S., Kijko A. *An Introduction to Mining Seismology*. International Geophysics; 1994. 399 p.
21. Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970;75(26):4997–5009. <https://doi.org/10.1029/JB075i026p04997>
22. Madariaga R. Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1976;66(3):639–666. <https://doi.org/10.1785/BSSA0660030639>
23. Gibowicz S., Harjes H.-P., Schäfer M. Source parameters of seismic events at Heinrich Robert mine, Ruhr Basin, Federal Republic of Germany: Evidence for non-double-couple events. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1990;80(1):88–109. <https://doi.org/10.1785/BSSA0800010088>



24. Остапчук А.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Павлов Д.В., Гридин Г.А. Особенности формирования динамического сдвига в тонком слое гранулированного материала. *Физика Земли*. 2021;(5):91–103. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050136>

References

1. Adushkin V.V., Turuntaev S.B. *Technogenic seismicity – induced and triggered*. Moscow: Institute of Geosphere Dynamics RAS, 2015, 364 p. (In Russ.)
2. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
3. Kozyrev A.A., Kasparyan E.V., Fedotova Iu.V. Monitoring of mining-induced seismicity in the Khibiny rock massif. In: *Rock Dynamics – Experiments, Theories and Applications. Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3), June 26–27, 2018, Trondheim, Norway*. London: CRC Press; 2018, pp. 469–474.
4. Adushkin V.V. Tectonic earthquakes of anthropogenic origin. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016;52(2):173–194. <https://doi.org/10.1134/S1069351316020014>
5. Heesakkers V., Murphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth, part I: structure and rupture of the Pretorius fault, TauTona Mine, South Africa. *Pure and Applied Geophysics*. 2011;168(12):2395–2425. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0354-7>
6. Sainoki A., Mitri H.S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;66:19–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.12.003>
7. Bai J., Dou L., Li J., Zhou K., Cao J., Kan J. Mechanism of Coal Burst Triggered by Mining-Induced Fault Slip Under High-Stress Conditions: A Case Study. *Frontiers of Earth Science*. 2022;10:884974. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.884974>
8. Kremenetskaya E.O., Triapitsin V.M. Induced seismicity in the Khibiny massif (Kola Peninsula). *Pure and Applied Geophysics*. 1995;145(1):29–37. <https://doi.org/10.1007/BF00879481>
9. Kocharyan G., Qi C., Kishkina S., Kulikov V. Potential triggers for large earthquakes in open pit mines: a case study from Kuzbass, Siberia. *Deep Underground Science and Engineering*. 2022;1(2):101–115. <https://doi.org/10.1002/dug.2.12028>
10. Korchak P.A., Zhukova S.A., Menshikov P.Yu. Seismic monitoring build-up and development in the production activity zone of Apatit JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(10):42–46. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.ru/journal/1354/article/23221/>
11. Kozyrev A.A., Onuprienko V.S., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
12. Kocharyan G.G. Origin and development of sliding processes in the continental fault zones under the action of natural and man-made factors: a state-of-the-art review. *Fizika Zemli*. 2021;(4):3–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>
13. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):95–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
14. Kozyrev A.A., Batugin A.S., Zhukova S.A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):31–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06>
15. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws. *Nature*. 1998;391:37–42. <https://doi.org/10.1038/34097>
16. Kocharyan G.G. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS; 2016. 424 p. (In Russ.)
17. Besedina A.N., Kishkina S.B., Kocharyan G.G. Source parameters of microseismic swarm events induced by the explosion at the Korobkovo iron ore deposit. *Fizika Zemli*. 2021;(3):63–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002333721030030>
18. Grigoriev A.M. *Geomechanical substantiation of underground mining of KMA iron ore deposits under flooded rock mass: Dis. ... Cand. Sci. (Eng.)*. Belgorod; 2008. 148 p. (In Russ.)
19. Keilis-Borok V.I. *Investigation of the mechanism of earthquakes*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1957. 148 p. (In Russ.)
20. Gibowicz S., Kijko A. *An Introduction to Mining Seismology*. International Geophysics; 1994. 399 p.
21. Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970;75(26):4997–5009. <https://doi.org/10.1029/JB075i026p04997>
22. Madariaga R. Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1976;66(3):639–666. <https://doi.org/10.1785/BSSA0660030639>
23. Gibowicz S., Harjes H.-P., Schäfer M. Source parameters of seismic events at Heinrich Robert mine, Ruhr Basin, Federal Republic of Germany: Evidence for non-double-couple events. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1990;80(1):88–109. <https://doi.org/10.1785/BSSA0800010088>
24. Ostapchuk A.A., Kocharyan G.G., Morozova K.G., Pavlov D.V., Gridin G.A. Peculiarities of dynamic slip nucleation in a thin granular layer. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2021;57(5):659–670. <https://doi.org/10.1134/S106935132105013X>

Информация об авторах

Беседина Алина Николаевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
Кочарян Геворг Грантович – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по науке, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук г. Москва, Российская Федерация; e-mail: gevorgkidg@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.01.2023
Поступила после рецензирования: 20.02.2023
Принята к публикации: 21.02.2023

Information about the authors

Alina N. Besedina – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Gevorg G. Kocharyan – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Deputy Director for Science, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: gevorgkidg@mail.ru

Article info

Received: 27.01.2023
Revised: 20.02.2023
Accepted: 21.02.2023