

УДК 550.34; 622.235.535

НОВЫЙ ПОДХОД К КОНТРОЛЮ ОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© 2024 г. Академик РАН В. В. Адушкин¹, А. Н. Беседина^{1,*}, Г. Г. Кочарян¹,
И. Э. Семенова², С. А. Жукова², О. Г. Журавлева²

Поступило 24.06.2024 г.

После доработки 03.07.2024 г.

Принято к публикации 09.07.2024 г.

Для выявления в окрестности горнодобывающих предприятий потенциально опасных тектонических разломов предлагается использовать очаговые характеристики слабых сейсмических событий, а именно, приведённую энергию и скорость распространения разрыва. Для анализа были выбраны два массива горных пород, в которых регистрировались микросейсмические события, индуцированные ведением горных работ. Первый, Коробковское железорудное месторождение Курской магнитной аномалии (КМА), расположен в асейсмичном регионе. Для второго участка, апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива, характерна довольно интенсивная природная и техногенная сейсмичность. Результаты анализа показали, что для рассматриваемых объектов значения приведённой сейсмической энергии и скорости распространения разрыва существенно отличаются. Для месторождения Хибинского массива значения параметров приближаются к диапазону значений для “нормальных” землетрясений. Для месторождения КМА полученные аномально низкие значения приведённой энергии и скорости распространения разрыва соответствуют “медленным” землетрясениям. Полученные результаты говорят о перспективности использования выбранных параметров в качестве индикаторов возможности возникновения крупных динамических событий на контролируемом участке разломной зоны.

Ключевые слова: техногенные землетрясения, горные работы, микросейсмический мониторинг, сейсмическая энергия, сейсмический момент, приведённая энергия, скорость распространения разрыва

DOI: 10.31857/S2686739724110161

Крупнейшие землетрясения, инициированные горными работами, связаны с динамическими подвижками по тектоническим трещинам и разломам [1, 2]. Такие события иногда называют техногенно-тектоническими, подчёркивая тем самым, что их подготовка определяется естественными причинами (тектонические и гравитационные силы), а триггером служит антропогенная деятельность — выемка пород, изменение гидрогеологической обстановки, массовые взрывы [3].

Магнитуда техногенно-тектонических землетрясений достигает весьма значительных

величин, вплоть до $M \sim 6$, так что такие события наносят значительный материальный ущерб. В отличие от природных землетрясений, гипоцентры которых находятся, как правило, на глубине, фактически недоступной для современных способов диагностики, очаги техногенных событий часто располагаются в пределах досягаемости инструментальных методов. На большинстве горнодобывающих предприятий существуют службы, осуществляющие, в том числе, мониторинг слабой сейсмичности. Представляется заманчивым попытаться использовать эти сведения для оценки и прогноза сейсмической опасности.

Известно, что динамическая подвижка, являющаяся источником интенсивных сейсмических колебаний, может произойти не на всяком разломе. Область старта сейсмогенного разрыва (так называемая “зона нуклеации”), согласно существующим представлениям, приурочена к особым участкам на будущей

¹Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской Академии наук, Москва, Россия

²Горный институт, Кольский научный центр Российской Академии наук, Апатиты, Россия

*E-mail: besedina.an@idg.ras.ru

поверхности скольжения — контактными зонами или “асперити”. Изначально эти зоны ассоциировали с участками повышенной прочности [4]. Однако в последние годы обнаруживается всё больше свидетельств в пользу того, что “асперити” это, в первую очередь, пятна с особыми фрикционными характеристиками, обладающие свойством разупрочнения при скольжении (Velocity Weakening, VW) [5]. Стартовав в окрестности такого пятна, разрыв может развиваться динамически. Сценарий развития сейсмогенного разрыва определяется именно наличием областей, обладающих разной динамикой фрикционных характеристик. На участках, обладающих свойством увеличения фрикционного сопротивления (Velocity Strengthening, VS), скорость распространения разрыва снижается и при больших размерах таких участков разрыв останавливается. Участки разупрочнения (VW-пятна) сложны, как правило, прочными кварцсодержащими породами, а VS-участки часто выполнены слабыми, слоистыми филлосиликатами [5].

Накопленная в массиве энергия упругих деформаций может быть реализована как в виде динамической подвижки по разлому, в ходе которой излучаются интенсивные сейсмические колебания, так и в виде более медленных движений, при которых в излучение идёт куда меньшая доля энергии. При крипе или при событиях медленного скольжения сейсмические колебания значимой амплитуды не регистрируются вовсе [1]. Макроскопические характеристики очага (магнитуда, излученная энергия, кажущееся напряжение) и параметры высокочастотных сильных движений грунта в ближней зоне землетрясения тесно связаны с характером распространения разрыва.

Степень “динамичности” подвижки удобно характеризовать отношением величины излученной сейсмической энергии E_s к значению скалярного сейсмического момента M_0 ($e = E_s / M_0$) — “приведённой сейсмической энергией”. Этот параметр в значительной степени обусловлен динамикой и кинематикой распространения разрыва землетрясения.

В настоящей работе в качестве индикаторов возможности осуществления динамической подвижки по разлому предлагается использовать очаговые характеристики слабых сейсмических событий, а именно, приведённую энергию и скорость распространения разрыва.

Такой подход основан на предположении, подтверждаемом результатами геологических изысканий [5], что если глина трения,

заполняющая зону скольжения магистрального сместителя разломной зоны, выполнена кварцсодержащим материалом, то и многие трещины в зоне влияния будут также содержать наполнитель с VW-свойствами. И, наоборот, многие трещины в зоне влияния VS-разлома будут содержать филлосиликаты. Таким образом, можно полагать, что определяя приведённую энергию и скорость распространения разрыва мелких сейсмических событий, природных или индуцированных горными работами, можно судить о сейсмогенности разломной зоны в целом.

В настоящей работе для анализа были выбраны два массива горных пород, в которых регистрировались микросейсмические события, индуцированные ведением горных работ. Первый находится в практически асейсмичном регионе — Коробковское железорудное месторождение Курской магнитной аномалии (КМА) (г. Губкин, Белгородская область), расположенное в центральной части Воронежского кристаллического массива. Объектом исследования является участок разлома “Северо-Восточный”, мощность зоны влияния которого достигает 100 м (рис. 1). На месторождении применяется этажно-камерная система разработки. По результатам натурных измерений напряжённо-деформированного состояния горизонтальные напряжения составляют 13 МПа, и в массиве пород на глубинах от 145 до 375 м превышают вертикальные в 1.5–2.0 раза [6]. Несмотря на относительно высокий уровень горизонтальных напряжений, горные удары в массиве ранее не наблюдались.

Для второго участка, в пределах которого расположено апатит-нефелиновое месторождение Хибинского массива (Мурманская область), характерна достаточно интенсивная природная и техногенная сейсмичность. Разработка исследуемого месторождения Хибин ведётся подземным способом с помощью подэтажной системы с принудительным обрушением вышележащей толщи пород. Для него характерно гравитационно-тектоническое поле напряжений, причём горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 3–4 раза, наблюдается рост максимальных сжимающих напряжений с глубиной. На горизонте +250 м максимальные напряжения составляют ≈ 35 МПа (руда), ≈ 50 МПа (вмещающие породы). Рудная залежь содержит дайки мончикитов мощностью до 15 м и линейные зоны окисления (шпреуштейнизации) мощностью до 40 м, затухающие с глубиной, что существенно влияет на геодинамический режим месторождения при ведении горных работ.

Многолетние наблюдения показали, что сейсмический режим контролируемого района разработки не стационарен, на месторождениях наблюдаются различные геодинамические явления: горно-тектонические удары, толчки, горные удары и микроудары, стреляние пород, динамическое заколообразование и шелушение. За последние несколько десятилетий на рудниках Хибинского массива отмечается значительный рост общего количества горных ударов и техногенных землетрясений, в том числе событий значительной магнитуды ($M > 3.5$), инициированных взрывами [2, 7, 8].

В шахте им. Губкина сейсмический мониторинг проводился на глубине 300 м от дневной поверхности с помощью временной мобильной сейсмической группы с апертурой ~ 150 м, состоящей из 4 акселерометров (Brüel&Kjaer 8306 и Dytran 3191A1 с рабочей полосой частот 0.08 Гц–1 кГц). Регистрация велась с частотой опроса 10 кГц. Измерительная система датчиков располагалась вблизи взрывной камеры. В данной работе проводился анализ последовательностей сейсмических событий, зарегистрированных после трёх массовых взрывов. Во всех случаях разрабатываемые камеры находились в зоне влияния Северо-Восточного разлома (рис. 1). Измерения проводились в период остановки работы оборудования в течение 10–15 ч после взрывов. Более подробно используемая система

мониторинга, способы детектирования и локализации сейсмических событий, применяемые на Коробковском месторождении КМА, описаны в нескольких публикациях, например в [9, 10].

Для сейсмических событий, зарегистрированных после массовых взрывов в шахте им. Губкина, для каждого дня регистрации создавался каталог временных записей волновых форм, а также основных очаговых параметров (моментная магнитуда, сейсмический момент, сейсмическая энергия, угловая частота источника, приведённая энергия).

Мониторинг сейсмичности на подземных рудниках Хибинского массива осуществляется непрерывно с помощью автоматизированных систем контроля.

В настоящей работе проводился анализ записей и оценка очаговых параметров 13 сейсмических событий, зарегистрированных в течение месяца на одном из участков апатит-нефелинового месторождения в 2020 г. в районе лежащего бока рудного тела. На этом участке отмечена миграция сейсмичности вместе с продвижением фронта горных работ. Считается, что инициированию наиболее сильных геодинамических явлений способствовали взрывные работы при торцевом выпуске руды вблизи эгириновой жилы, а также перераспределение напряжений за счёт выполненной надработки

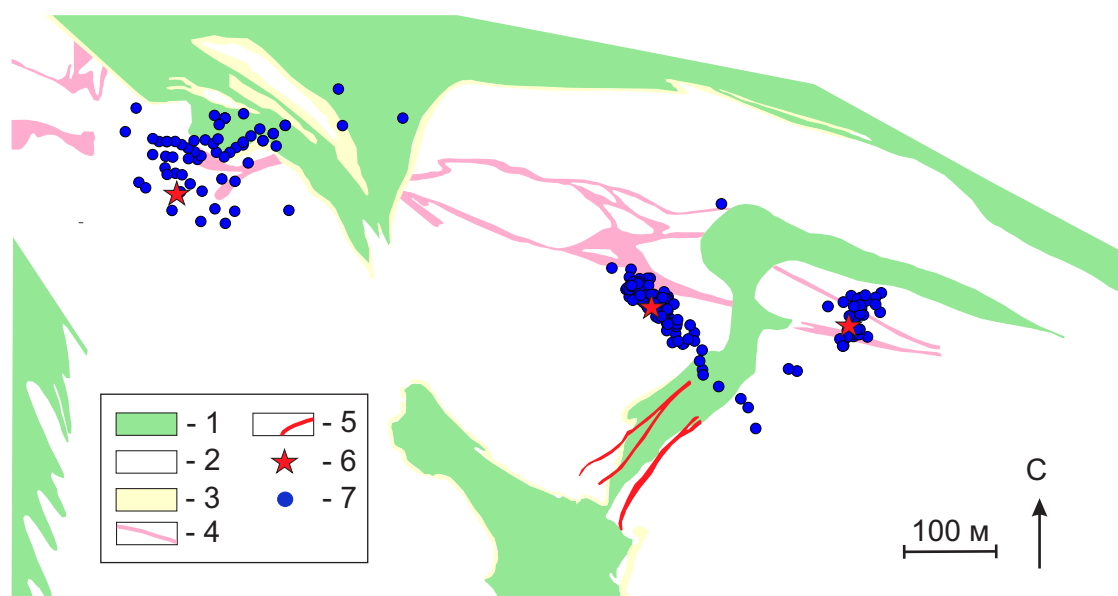


Рис. 1. Схема участка Коробковского месторождения КМА, включающего Северо-Восточный разлом: 1 — сланцевая свита, 2 — железорудная свита; 3 — безрудные или слаборудные кварциты; 4 — тело разлома; 5 — жильные образования; 6 — взрывная камера; 7 — сейсмические события.

массива. Массив в исследуемой области сложен породами подстилающего комплекса уртитов и уррита с апатитом. Коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова $f=9-11$, относящийся ко 2-й категории устойчивости. Внешние признаки удароопасности выражены слабо. Согласно расчётам уровень сжимающих напряжений не превышает 35 МПа. Для дальнейшего анализа записей волновых форм привлекались измерительные каналы акселерометров S1073 (рабочий диапазон 0.2–1000 Гц) и A1638 (рабочий диапазон 0.2–400 Гц) в трёхкомпонентном исполнении с частотой опроса 1000 Гц.

Первичная обработка данных заключалась в полосовой фильтрации с помощью фильтра Баттерворта 2-го порядка в диапазоне частот 10–1000 Гц для событий месторождения КМА и 8–100 Гц для месторождения Хибинского массива. На следующем этапе проводилась оценка параметров сейсмических событий. Расчёт скалярного сейсмического момента M_0 и угловой частоты источника f_0 выполнялся путём аппроксимации спектра смещения модельным спектром Дж. Брюна. По значениям сейсмического момента проводилась оценка моментной магнитуды. Излученная сейсмическая энергия E_s рассчитывалась как интеграл квадрата скорости смещения грунта в частотной области.

В соответствии с моделью круговой сдвиговой трещины [11] можно оценить радиус источника r_0 и величину сброшенного напряжения $\Delta\sigma$:

$$\begin{aligned} r_0 &= \left(\frac{KC_\beta}{2\pi f_0} \right), \\ \Delta\sigma &= \frac{7}{16} \frac{M_0}{r_0^3}. \end{aligned} \quad (1)$$

где K принимает значения $K_\alpha = 2.01$ и $K_\beta = 1.32$ для Р- и S-волн соответственно, C_β – скорость распространения поперечных волн.

Скорость распространения разрыва V_r оценивалась с помощью параметра излучательной эффективности

$$\eta_R = 2 \frac{\sigma_a}{\Delta\sigma}, \quad (2)$$

для сдвиговых и отрывных трещин соответственно [9]

$$\begin{aligned} \eta_R &= 1 - \frac{1 - \frac{V_r}{C_R}}{\sqrt{1 - \frac{V_r}{C_\beta}}}, \\ \eta_R &= \frac{V_r}{C_R}, \end{aligned} \quad (3)$$

где C_R – скорость волны Рэлея.

Результаты локации показали, что зарегистрированные сейсмические события на месторождении КМА группируются по большей части в окрестности ближайшей взрывной камеры и участка разломной зоны. Магнитуда M_w зарегистрированных событий варьируется от -2.7 до -0.8 , что соответствует значениям сейсмического момента $9.9 \cdot 10^4$ – $6.7 \cdot 10^7$ Н·м при угловой частоте источника 72–757 Гц. Излученная сейсмическая энергия составила $6.2 \cdot 10^{-4}$ –55 Дж (рис. 2). Согласно расчётам характерные размеры

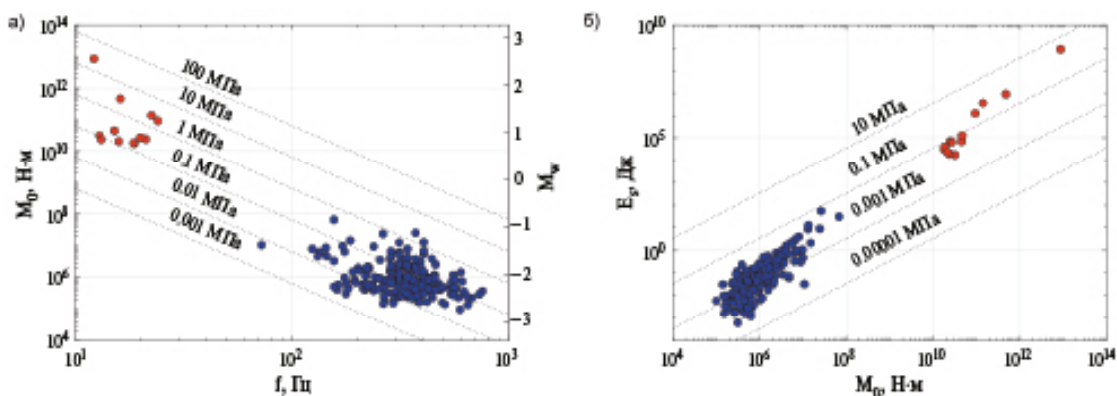


Рис. 2. а) Соотношение между скалярным сейсмическим моментом и угловой частотой источника для сейсмических событий. Серые линии – линии постоянного сброшенного напряжения. (б) Излученная сейсмическая энергия в зависимости от скалярного сейсмического момента. Серые линии – линии постоянного кажущегося напряжения $\sigma_a = \mu E_s / M_0$. Синие значки – Коробковское месторождение, красные значки – месторождение Хибинского массива.

разрывов для зарегистрированных событий составили десятки сантиметров – первые метры.

Для апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива получены более высокие значения магнитуд 0.74–2.5; сейсмический момент составил $9.9 \cdot 10^4$ – $6.7 \cdot 10^7$ Н·м при угловой частоте 12–24 Гц. Сейсмическая энергия варьируется от $1.7 \cdot 10^4$ – $8.7 \cdot 10^8$ Дж (рис. 2). Событие с наибольшей энергией $8.7 \cdot 10^8$ Дж ($M_w=2.5$) сопровождалось сотрясением горного массива. После него была зафиксирована афтершоковая последовательность сейсмических событий с энергией наибольшего афтершока $8.8 \cdot 10^6$ Дж ($M_w=1.7$). Характерный размер разрывов исследуемых событий по оценкам составил 27–54 м.

Значения приведённой сейсмической энергии существенно отличаются для сейсмических событий, зарегистрированных на рассматриваемых месторождениях. Для событий месторождения Хибинского массива значение рассчитанной приведённой энергии E_s / M_0 варьируется от $5.4 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-5} Дж/(Н·м), в то время как для Коробковского железорудного месторождения получены значения $5.3 \cdot 10^{-9}$ – $2.2 \cdot 10^{-6}$ Дж/(Н·м). Сопоставление полученных значений с результатами обработки параметров сейсмических событий с $M < 4$,

зарегистрированных на различных месторождениях мира, приведено на рис. 3.

Большая часть данных рис. 3, включая результаты, полученные на месторождении Хибинского массива, находятся в диапазоне значений $E_s / M_0 \sim 5 \cdot 10^{-7}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Дж/(Н·м), что соответствует типичным величинам для “нормальных” тектонических землетрясений [1]. Резко отличаются группы событий, зарегистрированных на Коробковском месторождении и в подземной лаборатории URL в Канаде [12].

Ещё одним важным параметром (помимо приведённой энергии), который описывает динамические свойства сейсмического источника, является скорость распространения разрыва V_r . Согласно классическим представлениям, для землетрясений $M > 3$ –4 этот параметр не зависит от масштаба события и составляет величину $(0.7$ – $0.9)C_\beta$. Для более слабых событий отмечается больший разброс значений. Здесь мы оставляем вне рассмотрения так называемые “supershear” землетрясения, для которых средняя скорость распространения разрыва может заметно превышать величину C_β .

Результаты анализа шахтной сейсмичности как правило иллюстрируют пониженные

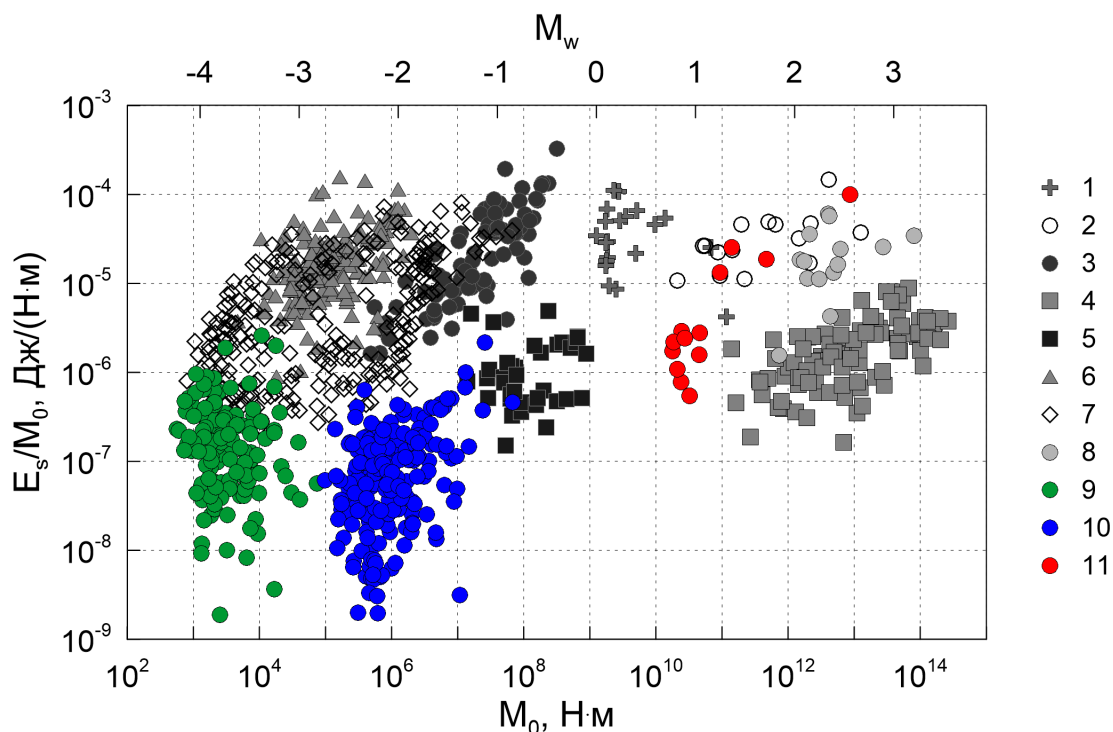


Рис. 3. Зависимость приведённой сейсмической энергии от сейсмического момента, ссылки на источники данных 1–8 приведены в [1, 9], 9 – [12]; 10 – Коробковское месторождение, 11 – месторождение Хибинского массива.

значения скорости разрыва относительно “нормальных” землетрясений.

Рассчитанные диапазоны значения средних скоростей разрыва для Коробковского и одного из Хибинских месторождений показаны на рис. 4. Для месторождения КМА скорость разрыва составляет $(0.008–0.5)C_\beta$ со средним значением $0.16C_\beta$ для трещин сдвига и $0.09C_\beta$ для трещин отрыва. Эти значения скорее соответствуют так называемым “медленным” землетрясениям. Для месторождения апатит-нефелиновых руд V_r составляет $(0.36–0.8)C_\beta$, что приближается к диапазону значений для “нормальных” землетрясений.

Важным фактором, который может влиять на реализуемый тип сейсмического события (“нормальное” или “медленное”) является вещественный состав материала заполнителя трещины. Геолого-структурный анализ некоторых участков разломной зоны показал, что для Северо-Восточного разлома характерно присутствие геоматериалов со свойствами скоростного упрочнения [13]. На месторождении Хибинского массива ряд идентифицированных событий, для которых удалось обнаружить следы косейсмической подвижки, был приурочен к эгириновой жиле, т.е.

нарушению, выполненному достаточно прочным VW-материалом. Важно подчеркнуть, что очагом одного из крупнейших землетрясений в Хибинах (1989 г., $M = 4.8–5$) являлась динамическая подвижка именно по пологопадающей эгириновой жиле [14].

Таким образом, сопоставление очаговых параметров микросейсмичности в окрестности двух горнодобывающих предприятий убедительно демонстрируют перспективность использования таких параметров, как приведённая энергия микроземлетрясений и средняя скорость распространения разрыва в качестве индикаторов возможности возникновения крупных динамических событий на исследуемом участке разломной зоны.

Количественные соотношения между долей медленных и быстрых событий, которые будут свидетельствовать о потенциальной “опасности”, ещё предстоит разработать.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-17-00204 Кочарян Г. Г., Беседина А. Н.) и госзадания (№ 122032900172-5 Адушкин В. В. и № 122022800579-4).

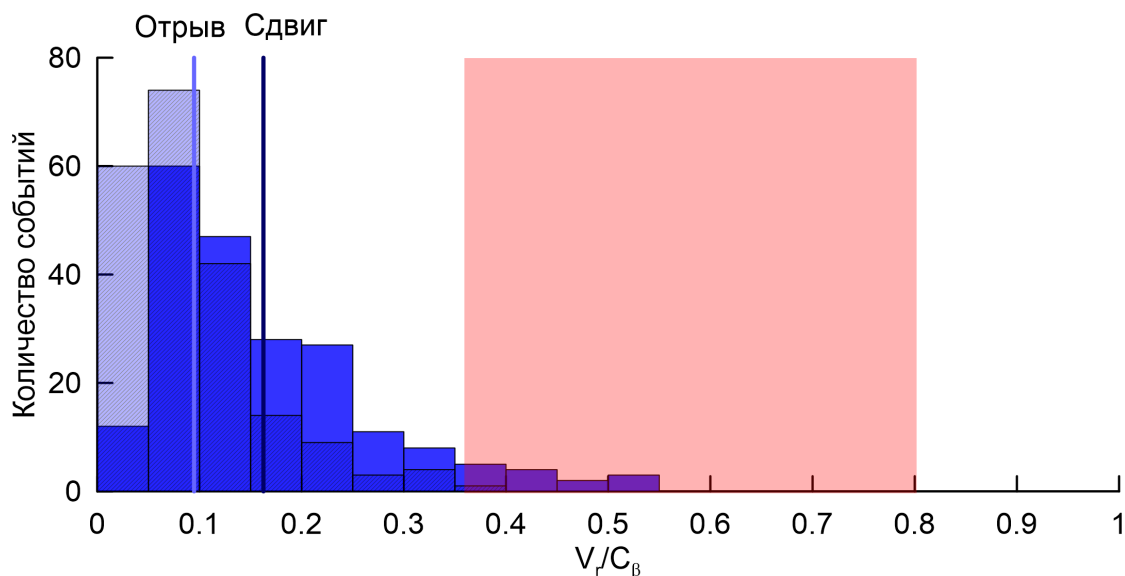


Рис. 4. Гистограмма скорости распространения разрыва для КМА: синяя — в предположении, что все события являются сдвиговыми событиями, голубая — в предположении, что все события являются отрывными трещинами. Вертикальными линиями показаны средние значения скорости: для отрывной трещины $V_r/C_\beta = 0.09$, для сдвиговой трещины $V_r/C_\beta = 0.16$. Область значения скорости V_r/C_β для месторождения Хибинского массива показана красной заливкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016, 424 с.
2. *Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В.* Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 12. С. 74–83.
3. *Адушкин В.В.* Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44.
4. *Гусев А.А.* Модель очага землетрясения со множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 41–55.
5. *Кочарян Г.Г., Беседина А.Н., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Остапчук А.А.* Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса // Физика Земли. 2023. № 3. С. 3–32.
6. *Адушкин В.В., Кишкина С.Б., Куликов В.Н., Павлов Д.В., Анисимов В.Н., Салтыков Н.В., Сергеев С.В., Спунгин В.Г.* Построение системы мониторинга потенциально опасных участков Коробковского месторождения Курской магнитной аномалии // ФТПРПИ. 2017. № 4. С. 3–13.
7. *Баранов С.В., Федоров А.В., Моторин А.Ю., Асминг В.Э., Федоров И.С.* Землетрясение 5 марта 2022 г. с $M_L=3.7$ в Хибинском массиве // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59. № 1. С. 21–32. DOI: 10.21455/si2023.1-2
8. *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. С. 19–26.
9. *Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г.* Параметры источников роя микросейсмических событий, инициированных взрывом на Коробковском железорудном месторождении // Физика Земли. 2021. № 3. С. 63–81.
10. *Беседина А.Н., Гридин Г.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Павлов Д.В.* Активизация сейсмоакустических событий после массовых взрывов на железорудном месторождении Курской магнитной аномалии // ФТПРПИ. 2024. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240101>
11. *Madariaga R.* Dynamics of an expanding circular fault // BSSA. 1976. V. 66. P. 639–666.
12. *Collins D., Young R.* Lithological controls on seismicity in granitic rocks // Bull. Seismol. Soc. Am. 2000. V. 90. P. 709–723. <https://doi.org/10.1785/0119990142>.
13. *Остапчук А.А., Морозова К.Г., Беседина А.Н., Гридин Г.А., Григорьева А.В., Павлов Д.В.* Особенности сейсмичности, инициированной массовыми взрывами, Коробковского железорудного месторождения // Russian Journal of Earth Sciences. 2024.
14. *Сырников Н.М., Тряпицын В.М.* О механизме техногенного землетрясения в Хибинах, Докл. АН СССР. 1990. Т. 314. № 4. С. 830–833.

A NEW APPROACH TO HAZARD CONTROL OF HUMAN-TRIGGERED EARTHQUAKES NEAR MINING FACILITIES

Academician of the RAS **V. V. Adushkin^a**, **A. N. Besedina^{a, #}**, **G. G. Kocharyan^a**,
I. E. Semenova^b, **S. A. Zhukova^b**, **O. G. Zhuravleva^b**

^a*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Mining Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation*

[#]*E-mail: besedina.an@idg.ras.ru*

It is proposed in this paper to use the focal characteristics of small seismic events, in particular, the scaled energy and the rupture propagation velocity, as indicators of possible dynamic movements along a fault. The two sites selected for analysis underwent microseismic events induced by mining operations. The first site, the Korobkovskoe iron ore deposit of the Kursk Magnetic Anomaly, is located in the aseismic region. The second site, the apatite–nepheline deposit of the Khibiny massif, is characterized by relatively intensive natural and human-triggered seismicity. Based on the results of the analysis, the values of the scaled seismic energy and the rupture propagation velocity are drastically different at the deposits under consideration. At the apatite–nepheline ore deposit, the parameter values are close to the range of values characteristic for “normal” earthquakes. At the KMA deposit, the obtained anomalously low values of the scaled energy and the rupture propagation velocity correspond to “slow” earthquakes. The results obtained are indicative of the prospects for using the selected parameters as indicators of possible large dynamic events at the studied site of the fault zone.

Keywords: technogenic earthquakes, mining, microseismic monitoring, seismic energy, seismic moment, scaled energy, rupture propagation velocity