

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.34; 622

АКТИВИЗАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПОСЛЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

А. Н. Беседина, Г. А. Гридин, Г. Г. Кочарян,
К. Г. Морозова, Д. В. Павлов

*Институт динамики геосфер им. акад. М. А. Садовского РАН,
E-mail: besedina.a@gmail.com, Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия*

Исследована слабая сейсмичность на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии. Используемая система измерений позволила зарегистрировать сейсмические события с магнитудой от -2.5 до -1.4 , индуцированные массовым взрывом. Точность локации гипоцентров составила ~ 50 м. Большинство очагов выделенных событий сосредоточено вблизи разломной зоны, пересекающей область выработки, а также на границе свит. Значения сейсмического момента выделенных событий находятся в пределах двух порядков $10^5 - 10^7$ Н·м при угловой частоте источника $70 - 600$ Гц. Рассчитанная сейсмическая энергия варьирует от 0.0006 до 1 Дж. Полученные значения приведенной сейсмической энергии от $2 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ Дж/(Н·м) и низкие скорости распространения разрыва позволяют отнести зарегистрированные события к категории медленных землетрясений.

Индукцированная сейсмичность, сейсмический мониторинг, подземная разработка месторождений, геодинамическая активность, очаговые параметры, магнитуда, кластеризация методом k-средних

DOI: 10.15372/FTPRPI20240101
EDN: LXEVBB

Подземная разработка твердых полезных ископаемых сопровождается ростом техногенной сейсмичности [1, 2]. По результатам наблюдений на каменноугольной шахте “Воркутинская” зарегистрированы геодинамические явления с магнитудами $0.60 - 1.98$ и энергетическими классами $3.22 - 6.69$ [3]. Постоянный сейсмический мониторинг проводится при разработке апатит-нефелиновых руд на месторождениях Хибинского массива [4, 5]. Сильнейший горно-тектонический удар произошел в 1989 г. с энергетическим классом 10.5 , локальной магнитудой 4.3 [6]. На Кировском руднике с 1997 по 2017 г. зарегистрировано 92 сейсмических события с энергией более 10^7 Дж [7, 8]. Развитие и усовершенствование автоматизиро-

ванной системы сейсмического мониторинга позволили обнаружить зоны проявления естественной сейсмичности [9]. На Северо-Уральском бокситовом руднике отмечен ряд мощных горно-тектонических ударов в 1984, 2004, 2010 гг. с локальными магнитудами 3.2, 3.2 и 3.5 соответственно [10]. Постоянный сейсмологический мониторинг также проводится на Верхнекамском месторождении калийных солей. Несмотря на то, что сами рудники не являются удароопасными, они подвержены интенсивным деформационным процессам, которые могут приводить к негативным последствиям [11–13]. Так, в 1995 г. зарегистрировано событие с локальной магнитудой 4.1 и энергетическим классом 10.1 [10].

Разработка подземных месторождений полезных ископаемых согласно нормативным рекомендациям зачастую требует проведения мероприятий, направленных на снижение риска и предотвращение негативных последствий возникновения опасных ситуаций и возможного ущерба. Комплекс работ может включать контроль напряженно-деформированного состояния массива горных пород [14], организацию и проведение деформационного [15] и сейсмического мониторинга [3, 4, 9, 16–19] вблизи структурно-нарушенных и техногенно-ослабленных участков, наблюдения за подземными [20] и трещинно-жильными водами [8].

В настоящей работе проводится анализ последовательности сейсмоакустических событий, индуцированных массовым взрывом на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии (КМА). Интерпретация полученных результатов проводилась с учетом метода классификации акустических и микросейсмических импульсов КЛАСИ-k, который позволяет выделять подмножества, характеризующиеся различием значений приведенной сейсмической энергии и длительностью процесса в очаге [21].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на шахте им. Губкина Коробковского железорудного месторождения КМА (АО “Комбинат КМАруда”), где применяется короткозамедленное взрывание и этажно-камерная система разработки, происходит последовательный подрыв нескольких камер, расположенных на расстояниях 1–3 км [17–18]. Месторождение характеризуется превышением горизонтальных напряжений над вертикальными при относительно небольшой глубине выработки ~300 м, а также наличием большой разломной зоны [22, 23]. Геодинамическая активность массива горных пород вблизи разломной зоны контролируется в связи с перспективой разработки более глубоких горизонтов, однако до настоящего времени горные удары на месторождении не наблюдались.

Сейсмический мониторинг осуществляется в периоды остановки работы горнодобывающего оборудования в дни проведения массовых взрывов. В данной работе рассмотрена активизация сейсмоакустических событий после массового взрыва 12.11.2022 г. (рис. 1). Около взрывной камеры 21.17сз вблизи разломной зоны установлена малоапертурная сейсмическая группа, оборудованная горизонтальными акселерометрами Bruel & Kjaer 8306 и Dytran 3191A1 с рабочей частотной полосой 0.08–1 кГц, которые крепились перпендикулярно стенке выработки. Сигналы регистрировались двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) National Instruments USB-6216 BNC с частотой опроса 10 кГц. Для синхронизации данных запись одного канала регистрации проводилась на два АЦП. Общий расход ВВ в камере 21.17сз составил 10 440 кг, максимальный расход ВВ в ступени замедления — 672 кг.

На первом этапе детектирование событий проводилось с превышением порога спектральной плотности мощности (СПМ) квадрата ускорения в окне длительностью 0.05 с (перекрытие 50 % в полосе частот 80–1000 Гц). Далее уточнение времени вступления выполнялось во временной области по критерию Акаике (AIC) в скользящем окне 0.002 с [24].



Рис. 1. Очаги сейсмических событий (залитые кружки), зарегистрированных после короткозамедленного взрыва в камере 21.17сз 12.11.2022, на плане шахтного поля (гор. –125 м). Треугольники — измерительные пункты T_1 – T_4 , оборудованные акселерометрами, звезда — область подрыва в камере; 1 — тело разлома; 2 — железорудная свита; 3 — безрудные или слаборудные кварциты; 4 — сланцевая свита; светло-серыми и темно-серыми кругами отмечены две группы событий с высоким коэффициентом корреляции

Минимум параметра AIC соответствует первому вступлению зарегистрированной сейсмической записи (рис. 2). В зависимости от времени вступлений выполнялась локация сейсмических сигналов с учетом скорости распространения продольных волн $C_\alpha = 5570$ м/с [17].

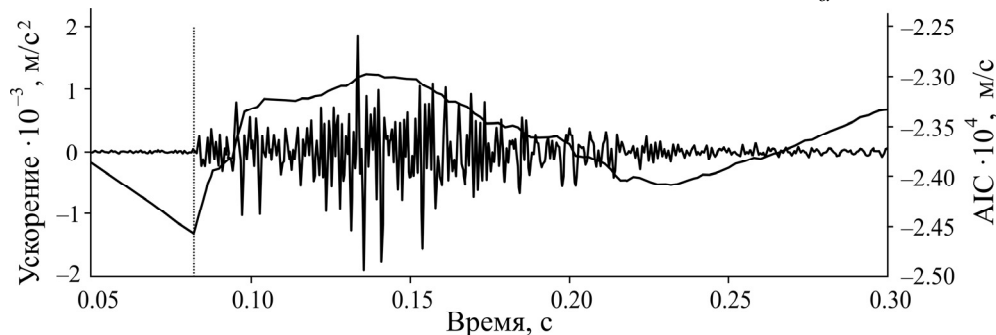


Рис. 2. Волновая форма записи сейсмического события № 4 на станции T_1 на расстоянии 139 м ($M_w = -1.7$) и рассчитанного критерия Акаике, применяемого для определения первого вступления в сейсмической записи. Пунктиром показан минимум параметра AIC

Пункт T_2 располагался вблизи трансформаторной подстанции, что привело к высокому уровню шума в целевом диапазоне частот, поэтому записи этой измерительной точки не использовались при локации. В результате определены координаты 64 событий (рис. 1). Для каждого измерительного пункта рассчитывался коэффициент корреляции между всеми выделенными сейсмическими событиями. Графики плотности вероятности распределения коэффициента корреляции имеют четкий максимум около 0.2. На всех каналах присутствует характеристический пик распределения при значениях коэффициента корреляции от 0.6 до 1.0 (рис. 3).

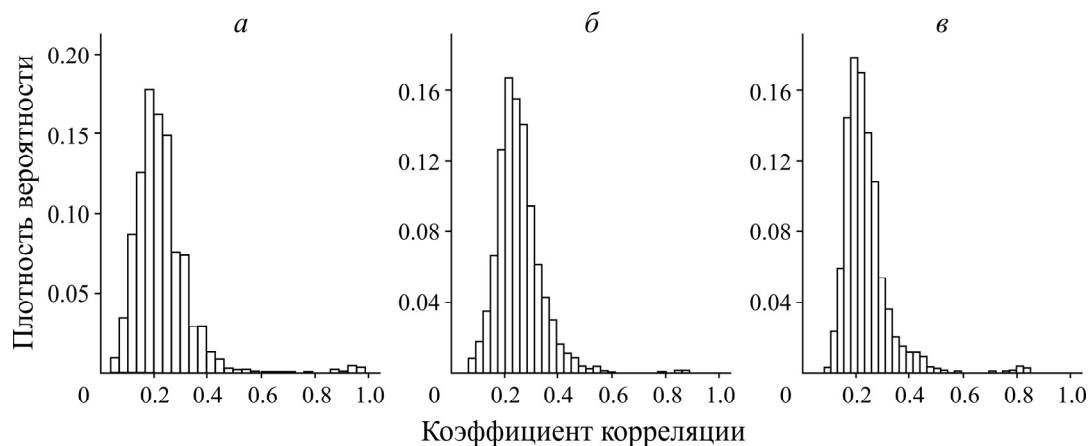


Рис. 3. Плотность вероятности распределения коэффициента корреляции между всеми событиями для измерительных пунктов T_1 (а), T_3 (б), T_4 (в)

На рис. 4 показана соответствующая корреляционная матрица для сейсмических событий при коэффициенте корреляции больше 0.6.

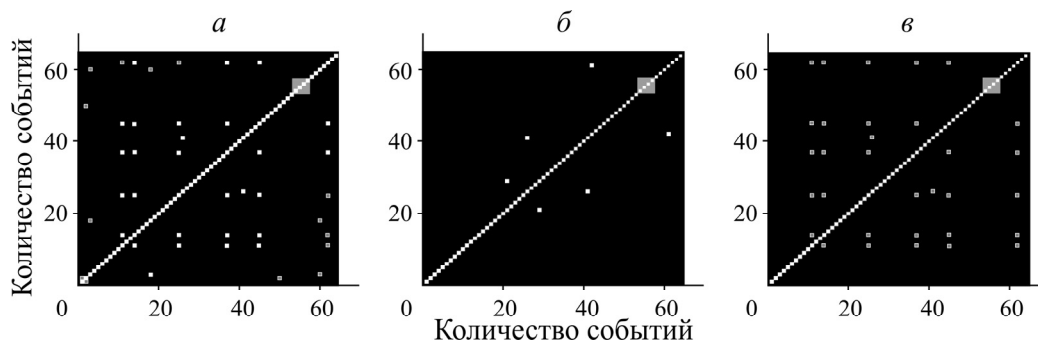


Рис. 4. Корреляционная матрица для сейсмических событий при коэффициенте корреляции больше 0.6 для измерительных пунктов T_1 (а), T_3 (б), T_4 (в)

Расчет скалярного сейсмического момента M_0 и угловой частоты источника f_0 проводился путем аппроксимации расчетного спектра смещения модельным спектром Брюна. Минимизация функционала $\sum (U(f) - U_{Br}(f))^2$ проводилась методом сеточного поиска, где $U(f)$ — расчетные значения спектра смещения для сейсмического события, $U_{Br}(f)$ — модельный спектр смещения:

$$U_{Br}(f) = \frac{U_0}{1 + \frac{f^2}{f_0^2}},$$

U_0 — аппроксимация низкочастотной части спектра. Значения U_0 использовались для вычисления скалярного сейсмического момента [24, 25]:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho C^3 R U_0}{F_c R_c S_c},$$

где ρ — плотность массива (при расчетах $\rho = 3400$ кг/м³); C — скорость распространения волн; R — расстояние от источника до пункта наблюдения; F_c — коэффициент, учитывающий

направленность излучения ($F_\alpha = 0.52$; $F_\beta = 0.63$); R_c — коэффициент, определяемый углом выхода луча на свободную поверхность (следуя [26], полагаем $R_c = 1$ для датчиков, расположенных в подземных выработках); S_c — станционная поправка.

Затухание в среде учитывалось путем введения множителя $\exp(-\pi Rf / (QC))$. Добротность Q взята равной 350 согласно [27], где для рудного месторождения наилучшая сходимость с модельным решением получена при таких значениях.

Излученная сейсмическая энергия рассчитывается как интеграл квадрата скорости смещения грунта в частотной области:

$$E_s = 4\pi\rho C J R^2, \\ J = 3 \cdot 2 \int_{f_1}^{f_2} |V(f)|^2 df.$$

Дополнительно вводилась поправка к сейсмической энергии за счет ограниченной частотной полосы датчика по [28].

Очаговые параметры (M_0 , f_0 , E_s) рассчитывались для каждой измерительной точки и затем усреднялись. По значениям сейсмического момента проводилась оценка моментной магнитуды [29, 30]:

$$M_w = \frac{2}{3}(\lg M_0 - 9.1).$$

Для определения сброса напряжения в массиве использовалось соотношение для модели кругового разлома [31]:

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

здесь r , C_β — радиус источника и скорость S -волн, а K принимает значения $K_\alpha = 2.01$ и $K_\beta = 1.32$ для P - и S -волн соответственно.

Кажущееся напряжение оценивалось по соотношению

$$\sigma_a = \mu \frac{E_s}{M_0},$$

модуль сдвига среды $\mu \approx 33$ ГПа.

Параметр излучательной эффективности, равный по [32]

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

можно использовать при оценке скорости распространения разрыва V_r для трещин сдвига [33]

$$\eta_R = 1 - \frac{1 - \frac{V_r}{C_R}}{\sqrt{1 - \frac{V_r}{C_\beta}}} \quad (1)$$

и трещин отрыва [34]

$$\eta_R = \frac{V_r}{C_R}, \quad (2)$$

где C_R — скорость волны Рэлея.

На последнем этапе проводилась классификация сейсмоакустических импульсов по алгоритму КЛАСИ- k , в основе которого лежит алгоритм кластеризации k -средних, позволяющий выделить подмножества событий, различающиеся приведенной сейсмической энергией (отношение излученной сейсмической энергии к реализованному сейсмическому моменту) и характерным временем в очаге.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используемая система измерений позволила зарегистрировать сейсмоакустические события, индуцированные массовым взрывом, с магнитудой $-2.5 \dots -1.4$. На рис. 5 показан приблизительный порог чувствительности системы сейсмических наблюдений и приведена зависимость магнитуд зарегистрированных событий от расстояния до станции T_4 . Все очаги событий находятся внутри зоны, в которой уровень динамических деформаций от взрывов достигает значения 10^{-6} , что согласуется с результатами анализа мониторинга при других взрывах на этом месторождении [18, 19].

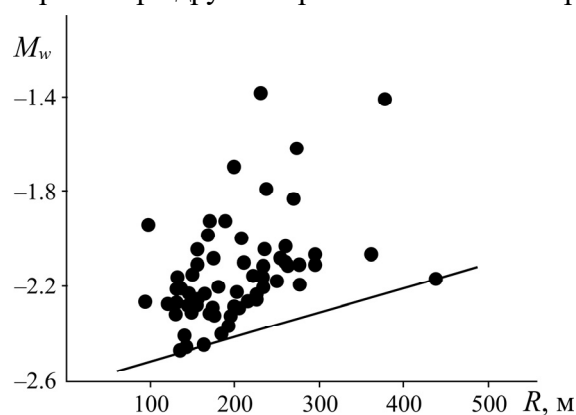


Рис. 5. Зависимость магнитуд зарегистрированных событий от эпицентрального расстояния относительно измерительного пункта T_4 . Прямая линия — приблизительный порог чувствительности системы сейсмических наблюдений

На графике зависимости кумулятивного количества событий от времени отмечен резкий всплеск сразу после массового взрыва с последующей постепенной релаксацией в течение 4–5 ч (рис. 6а). Наклон графика повторяемости меньше -1 , имеет излом при $M_w = -2.12$ (рис. 6б); наблюдается уменьшение количества событий с магнитудами больше -2 .

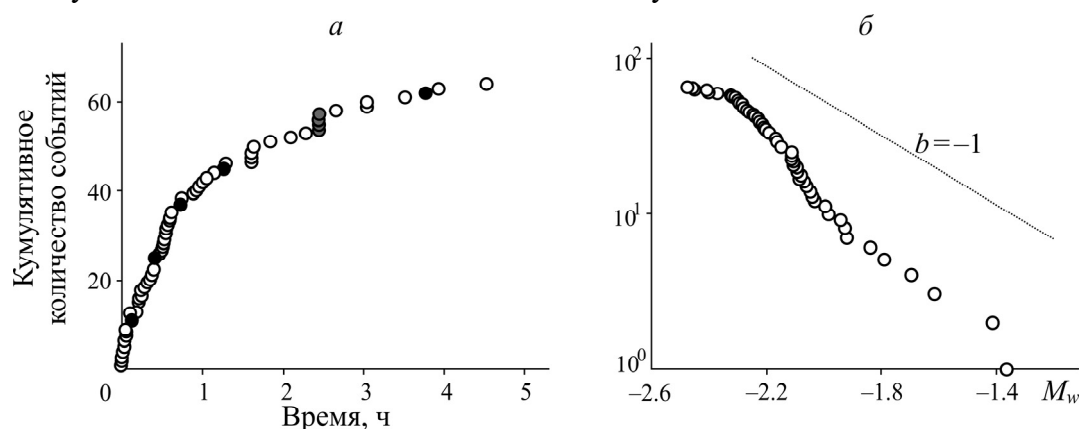


Рис. 6. Анализ сейсмичности для событий, зарегистрированных после короткозамедленного взрыва в камере 21.17сз 12.11.2022: а — зависимость кумулятивного количества событий от времени; “ноль” — соответствует массовому взрыву; б — повторяемость сейсмических событий

Анализ корреляционной матрицы (см. рис. 4) позволил выделить две группы событий с высоким коэффициентом корреляции для каждой из измерительных точек T_1 , T_3 , T_4 . В первую группу вошло 6 событий (№ 11, 14, 25, 37, 45, 62, темно-серая заливка рис. 6а), которые распределены во времени. В течение первого часа после взрыва произошли 4 события, в течение второго и третьего часа — еще 2. Все 6 событий группы отмечены в окрестности 40 м друг от друга, 3 из них имеют одинаковые координаты очага (рис. 1). Вторая группа состоит из 4-х событий, которые произошли последовательно в течение 13 мин (№ 54–57, светло-серая заливка на рис. 6а). Расстояние между очагами событий этой группы составляет не более 50 м.

На рис. 7 показаны примеры повторяющихся событий-дуплетов внутри каждой группы. Представлены две совмещенные волновые формы событий и соответствующие им спектры смещения. Определены значения коэффициента корреляции по измерительным пунктам $T_1 / T_3 / T_4$: соответственно 0.97 / 0.53 / 0.83 для событий 14 и 45 и 0.94 / 0.86 / 0.72 — для 56 и 57.

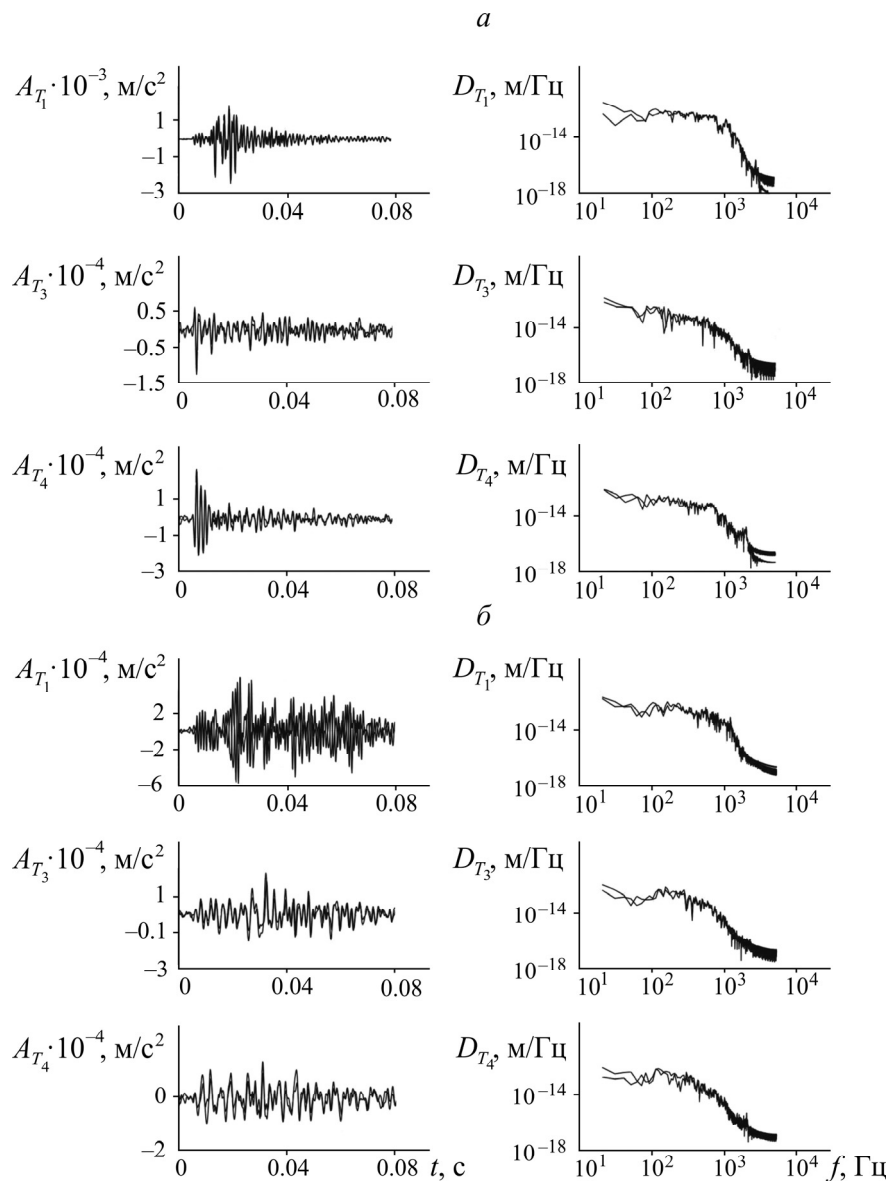


Рис. 7. Волновые формы ускорения и спектра смещения для событий с высоким коэффициентом корреляции: события № 14 и 45 (а) и № 56 и 57 (б)

Отмечается затухание высоких частот при переходе от волновых форм ускорения, записанных в пункте T_1 , к пунктам T_3 и T_4 . Это согласуется с моделью распространения импульса в среде с поглощением, когда закономерности снижения амплитуды колебаний с расстоянием зависят от спектрального состава сигнала и добротности среды. Отмеченное затухание колебаний в высокочастотной области может быть связано с наличием разломной зоны, которая пересекает рудное поле (рис. 1). Отметим, что в рассматриваемом случае большинство очагов выделенных сейсмических событий сосредоточено вблизи разломной зоны, пересекающей область выработки, а также на границе железорудной, безрудной/слаборудной и сланцевой свиты. В предыдущих работах по исследованию активизации слабых сейсмических событий при ведении взрывных работ в шахте им. Губкина большинство сейсмических событий было сосредоточено в окрестности взрывной камеры [17, 19].

Значения сейсмического момента находятся в пределах $10^5 - 10^7$ Н·м при угловой частоте источника 70–600 Гц (рис. 8а). Полученные значения магнитуд $-2.5 \dots -1.4$ соответствуют радиусам очага от первых метров до первых десятков метров. Значение рассчитанной сейсмической энергии варьируется от 0.0006 до 1 Дж, приведенной сейсмической энергии от $2 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ Дж/(Н·м) (рис. 8б, в).

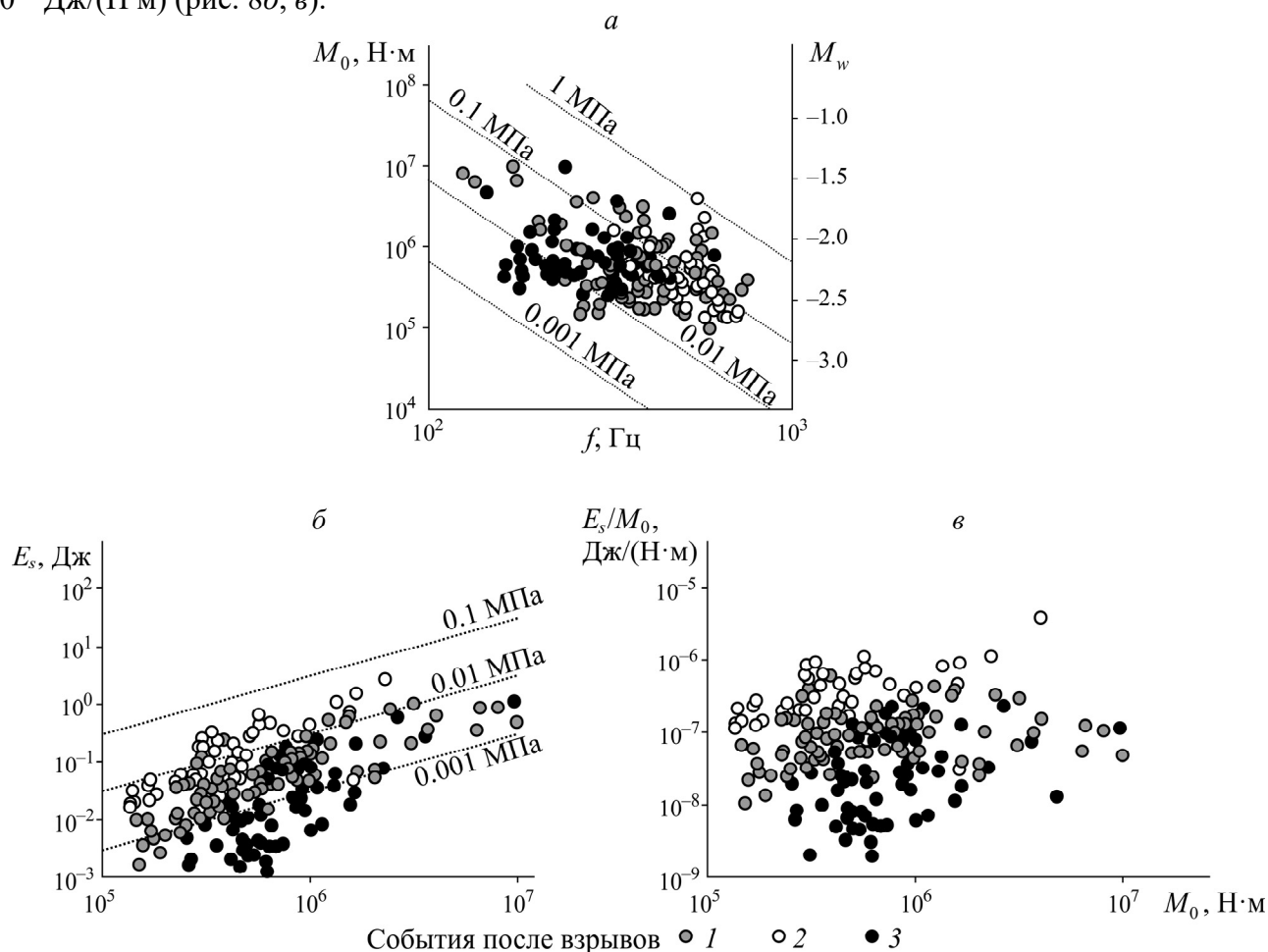


Рис. 8. Соотношение между скалярным сейсмическим моментом и угловой частотой источника (а); сейсмическая энергия излученная (б) и приведенная (в) в зависимости от скалярного сейсмического момента для событий, зарегистрированных после трех различных короткозамедленных взрывов: 1 — 06.07.2019; 2 — 24.10.2020; 3 — 12.11.2022. События после взрывов 1 и 2 приведены по данным [19]

Данные параметров сейсмических событий для взрыва 12.11.2022 приведены в сопоставлении с параметрами событий, зарегистрированных после взрывов 06.07.2019 (взрыв 1) [17, 18] и 24.10.2020 (взрыв 2) [19]. Несмотря на схожие значения сейсмического момента и угловой частоты источника для событий, зарегистрированных после трех взрывов, значения сейсмической энергии и приведенной энергии для взрыва 12.11.2022 (взрыв 3), в сравнении с взрывами 1 и 2, значительно ниже. Сейсмические события, относящиеся ко взрыву 3, происходили вдоль разломной зоны и на границах железорудной и сланцевых свит. Для взрыва 1 также характерно наличие разломной зоны, которая расположена вдоль взрывной камеры; взрывная камера при взрыве 2 находится на удалении от разлома. Таким образом, более высокие значения энергии E_s получены для сейсмических событий после взрыва 2, на удалении от зоны нарушенности. Полученные закономерности подтверждают сформулированное ранее предположение о влиянии структурного и вещественного состава вмещающего массива и заполнителя трещин на масштабные соотношения [19].

Значение скорости распространения разрыва рассчитывалось для всей выборки событий по (1)–(2) в предположении, что все события являются трещинами отрыва или трещинами сдвига. Скорость распространения разрыва для трещин с отрывным механизмом принимает более низкие значения. Медианные значения для взрыва 3 составляют $V_r / C_\beta = 0.09 - 0.16$. Для взрыва 1 значения скорости несколько выше: $V_r / C_\beta = 0.19 - 0.31$. Наибольшие значения скорости распространения разрыва получены для взрыва 2: $V_r / C_\beta = 0.22 - 0.36$ [19]. Рассчитанные скорости распространения разрыва для индуцированных событий на шахте им. Губкина намного ниже характерных значений при динамических подвижках: $V_r / C_\beta \approx 0.8 - 0.9$. 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. Это свидетельствует о влиянии структурных и механических свойств локального участка массива на параметры индуцированной сейсмичности. На основе полученных закономерностей можно полагать, что в результате анализа очаговых параметров слабой сейсмичности приобретает важная дополнительная информация о склонности участка к динамическим подвижкам по разломам и крупным тектоническим трещинам.

Применение метода КЛАСИ-к на основе параметров M_0 , f_0 , E_s , E_s / M_0 позволило выделить в ансамбле сейсмических событий два подмножества (рис. 9).

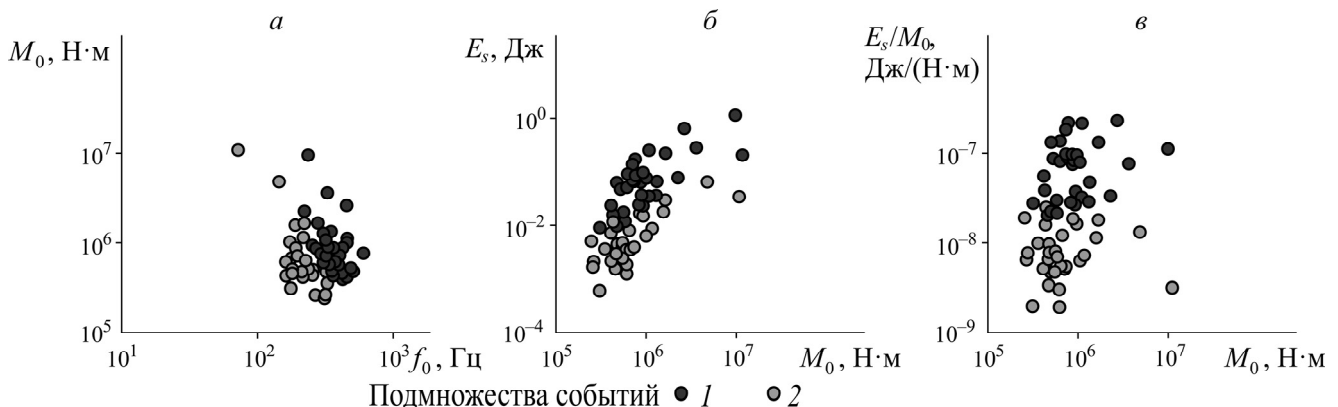


Рис. 9. Классификация сейсмоакустических импульсов по алгоритму КЛАСИ-к, зарегистрированных после взрыва 12.11.2022: а — зависимость сейсмического момента от угловой частоты источника; б — соотношение между излученной сейсмической энергией и скалярным сейсмическим моментом; в — соотношение между приведенной сейсмической энергией и скалярным сейсмическим моментом

Первое подмножество характеризуется приведенной сейсмической энергией E_s / M_0 более $2 \cdot 10^{-8}$ Дж/(Н·м), второе — менее $2 \cdot 10^{-8}$ Дж/(Н·м). События первого типа отличаются меньшей длительностью в очаге, чем события второго типа при одном и том же реализованном сейсмическом моменте. Для выделенных отмеченных типов зависимость времени в очаге от сейсмического момента близка к закону самоподобия. Аналогичные результаты получены при классификации сейсмических импульсов, зарегистрированных после взрывов 1 и 2 [34]. Предложенный подход позволяет выделять события с различными значениями сброшенного напряжения.

ВЫВОДЫ

Сейсмический мониторинг, проводимый на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии, позволил выделить слабые сейсмические события, индуцированные горными работами, с моментными магнитудами $-2.5 \dots -1.4$. Полученные значения магнитуд соответствуют подвижкам по трещинам длиной около 1–10 м.

Небольшое количество сейсмических событий, которые зарегистрированы в периоды прекращения работы горнодобывающего оборудования в дни проведения массовых взрывов, свидетельствует о том, что наблюдаемые сейсмические сигналы связаны именно с динамическим деформированием массива горных пород массовыми взрывами. Предложенный подход к анализу сейсмических событий на основе расчета корреляционной матрицы позволил оценить ошибку локации, которая составила ~ 50 м.

Полученные пониженные значения приведенной сейсмической энергии от $2 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ Дж/(Н·м) и низкие скорости распространения разрыва позволяют отнести зарегистрированные события к категории медленных землетрясений. Показано существенное влияние структурных и механических свойств локального участка массива на параметры индуцированной сейсмичности. 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.

Изучение очаговых параметров слабой сейсмичности дает важную дополнительную информацию о склонности участка к динамическим подвижкам по разломам и крупным тектоническим трещинам. Классификация сейсмических событий позволяет исследовать “тонкую структуру” их ансамбля для анализа напряженного состояния локальной области массива горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко А. А., Мулев С. Н., Штирц В. А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений // ФТПРПИ. — 2022. — № 1. — С. 12–22.
2. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., and Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes, *Earth-Sci. Rev.*, 2018, Vol. 178. — P. 438–514.
3. Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Куликов В. И. Мониторинг геодинамических событий на Воркутинском месторождении // Динамические процессы в геосферах. — 2015. — Т. 7. — С. 76–85.
4. Жукова С. А., Журавлева О. Г., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива // ГИАБ. — 2022. — № 7. — С. 5–17.
5. Жукова С. А., Журавлева О. Г., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Изменение потока сейсмической энергии при переходе на глубокие горизонты (месторождение Апатитовый цирк, Хибинский массив) // Горн. пром-сть. — 2023. — № 4. — С. 110–116.

6. Козырев А. А., Каган М. М., Константинов К. Н., Жиров Д. В. Деформационные предвестники техногенного землетрясения на объединенном Кировском руднике ОАО “Апатит” // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посвященной 80-летию акад. М. В. Курлени (3–6 октября 2011 г.). — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. — Т. 2. — С. 228–234.
7. Zhukova S., Korchak P., Streshnev A., and Salnikov I. Geodynamic rock condition, mine workings stabilization during pillar recovery at the level +320 m of the Yukspor deposit of the Khibiny massif, Problems of Complex Development of Georesources, Electronic resource, Web Conf., 2018. — 02022.
8. Козырев А. А., Батугин А. С., Жукова С. А. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин // Горн. журн. — 2021. — № 1. — С. 31–36.
9. Асминг В. Э., Федоров А. В., Федоров И. С., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Автоматизированная система сейсмического мониторинга Восточного рудника КФ АО “Апатит”: программно-аппаратные решения // ГИАБ. — 2023. — № 8. — С. 45–62.
10. Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 68–73.
11. Шулаков Д. Ю., Бутырин П. Г., Верхованцев А. В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горн. журн. — 2018. — № 6. — С. 25–29.
12. Злобина Т. В. Влияние ширины и высоты выработки на проявления микросейсмической активности в калийных рудниках // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 136–145.
13. Злобина Т. В., Дягилев Р. А. Апробация метода прогноза сейсмической активности для Верхнекамского месторождения калийных солей // ГИАБ. — 2022. — № 4. — С. 56–66.
14. Еременко В. А. Гипсово-скважинная станция контроля напряжённо-деформированного состояния структурно нарушенного и удароопасного массива горных пород Абаканского месторождения // ГИАБ. — 2015. — № 3. — С. 5–13.
15. Мельницкая М. Е. Разработка методов прогноза удароопасности блочного массива на основе деформационного мониторинга: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПГУ, 2021. — 116 с.
16. Маловичко А. А., Маловичко Д. А. Оценка силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий // Методы и системы сейсмореформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. — 2010 — Т. 2. — С. 66–92.
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. — С. 63–81.
18. Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В. Характеристики слабой сейсмичности, индуцированной горными работами на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 12–24.
19. Беседина А. Н., Кочарян Г. Г. Новый подход к снижению риска крупных техногенных землетрясений, основанный на результатах микросейсмического мониторинга // Горн. пром-сть. — 2023. — № S1. — С. 43–47.
20. Горбунова Э. М., Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Батухтин И. В., Петухова С. М. Постсейсмические эффекты массовых взрывов, выделенные при разработке железорудных месторождений КМА // Динамические процессы в геосферах. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 51–68.
21. Морозова К. Г., Остапчук А. А., Беседина А. Н., Павлов Д. В. Классификация сейсмических событий, сопровождающих взрывной способ разработки массива горных пород // Сейсмические приборы. — 2022. — Т. 58. — № 4. — С. 97–110.

22. 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.
23. Кочарян Г. Г., Будков А. М., Кишкина С. Б. Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 34–44.
24. Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., and Manuello A. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures, Cem. Concr. Compos., 2012, Vol. 34, No. 4. — P. 529–537.
25. Кейлис-Борок В. И. Исследование механизма землетрясений. — М.: АН СССР, 1957. — 148 с.
26. Gibowicz S. and Kijko A. An Introduction to Mining Seismology, Int. Geophysics, 1994, Vol. 55. — 399 p.
27. Oye V., Bungum H., and Roth M. Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi ore mine, Finland, BSSA, 2005, Vol. 95, No. 3. — P. 1011–1026.
28. Ide S. and Beroza G. Does apparent stress vary with earthquake size? Geophys. Res. Lett., 2001, Vol. 28, No. 17. — P. 3349–3352.
29. Kanamori H. The energy release in great earthquakes, J. Geophys. Res., 1977, Vol. 82. — P. 2981–2987.
30. Hanks C. and Kanamori H. A moment magnitude scale, J. Geophys. Res., 1979, Vol. 84. — P. 2348–2350.
31. Madariaga R. Dynamics of an expanding circular fault, BSSA, 1976, Vol. 66. — P. 639–666.
32. Husseini M. Energy balance for motion along a fault, Geophys. J. Int., 1977, Vol. 49, No. 3. — P. 699–714.
33. Venkataraman A. and Kanamori H. Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes, J. Geophys. Res., 2004, Vol. 109. — B05302.
34. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. — М.: Наука, 1975. — 173 с.

Поступила в редакцию 08/XI 2023

После доработки 20/I 2024

Принята к публикации 24/I 2024