

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ КОРОБКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ИНИЦИИРОВАННОЙ МАССОВЫМИ ВЗРЫВАМИ

А. А. Остапчук^{*1,2}, К. Г. Морозова¹, А. Н. Беседина¹,
Г. А. Гридин^{1,2}, А. В. Григорьева^{1,3}, и Д. В. Павлов¹

¹Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва,
Россия

* **Контакт:** Алексей Андреевич Остапчук, ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Интенсификация горных работ всё чаще приводит к появлению крупных природно-техногенных землетрясений и горно-тектонических ударов в ранее слабосейсмичных и асейсмичных областях. Иницирование крупных сейсмических событий связано с проскальзыванием по существующим тектоническим разломам и крупным трещинам, структура которых существенно изменяется вдоль их простирания. В настоящей работе проводится анализ параметров шахтной сейсмичности на Коробковском железорудном месторождении, в пределах которого локализован крупный Северо-Восточный разлом. Анализ проводится с целью оценки вероятности иницирования крупных сейсмических событий на участках разлома с различной структурой осевой зоны. На месторождении применяется технология короткозамедленного взрывания и этажно-камерная система разработки, что вызывает иницирование слабой сейсмичности в пределах шахтного поля. При массовых взрывах во вмещающем массиве сейсмические события локализуются в пределах разрабатываемой камеры. Статистика магнитуд сейсмических событий описывается степенным законом, а значение скейлингового параметра b -value, как правило, меньше 2. При взрывах в окрестности разлома сейсмические события локализуются вдоль его простирания, а скейлинговый параметр b -value имеет значение больше 2. Для Коробковского железорудного месторождения главной особенностью индуцированных событий является их низкая приведенная энергия $8,9 \times 10^{-9} - 4,9 \times 10^{-7}$, Дж/(Н·м) соответствующая классу «медленных» землетрясений. Ядро Северо-Восточного разлома сложено преимущественно породами со свойством скоростного упрочнения, что, также, обуславливает иницирование именно медленных событий. Совместный анализ данных сейсмического мониторинга и сведений о структурных и реологических свойствах пород, слагающих ядро разлома, позволяет предполагать, что в окрестности Северо-Восточного разлома в пределах шахтного поля накопленные деформации могут реализовываться преимущественно посредством медленных и асейсмичных подвижек.

Ключевые слова: медленные землетрясения, скоростное упрочнение, шахтная сейсмичность, тектонический разлом, сейсмический мониторинг.

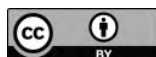
Цитирование: Остапчук, А. А., К. Г. Морозова, А. Н. Беседина, Г. А. Гридин, А. В. Григорьева, и Д. В. Павлов Особенности сейсмичности Коробковского железорудного месторождения, иницированной массовыми взрывами // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES5013. — DOI: 10.2205/2024es000941 — EDN: LEPIXG

<https://elibrary.ru/lepixg>

Получено: 8 мая 2024 г.

Принято: 11 октября 2024 г.

Опубликовано: 30 декабря 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

Введение

Для контроля напряженного состояния массива горных пород, а также для предотвращения катастроф и минимизации ущерба от сейсмических событий в зоне добычи полезных ископаемых, широко используются сейсмические и акустические методы контроля [Востриков и др., 2016; Гуляров и др., 2014; Захаров, 2002; Лавров и Шкуратник,

2005; Опарин и др., 2013; Патонин и др., 2018; Смирнов и др., 1995; Шжуратник и Вознесенский, 2009; Bolton et al., 2019; Dixon et al., 2018]. В последние десятилетия интенсификация добычи полезных ископаемых привела не только к росту слабой сейсмичности [Foulger et al., 2018], но и к техногенным землетрясениям значительной магнитуды [Adushkin, 2018; Emanov et al., 2017; Kocharyan et al., 2022]. Крупные землетрясения обычно приурочены к разломам, локализованным в пределах месторождений или в непосредственной близости от зоны ведения работ [Кочарян, 2016]. При этом из-за небольшой глубины очага такие события могут приводить к существенным разрушениям инфраструктуры на поверхности [Ловчиков, 2013; Lu et al., 2018].

Тектонические разломы характеризуются пространственно-неоднородной структурой [Fagereng and Sibson, 2010]. На периферии разлома находится зона динамического влияния толщиной от первых метров до сотен метров, ассоциирующаяся обычно с зоной повышенной, по сравнению с вмещающим массивом, плотности трещин [Лобацкая, 1983; Шерман и др., 1983]. Хрупкая фрагментация интенсифицируется по направлению к ядру разлома. В отличие от зоны влияния ядро разлома характеризуется наличием глинки трения, катаклазитов, ультракатаклазитов и иногда брекчии. В ядре разлома происходит накопление основной части катакlastических деформаций. В зависимости от фрикционных свойств материала, слагающего ядро, закономерности локализации деформаций и их интенсивность существенно отличаются [Fagereng and Sibson, 2010]. Структура осевой зоны разлома, в пределах которого локализуются быстрые динамические подвижки, инициирующие обычные землетрясения, представляется в виде ультракатакlastического ядра, сложенного веществом со свойством скоростного разупрочнения, фрикционная прочность которых соответствует закону трения Байерли, например, кварц, полевой шпат, пироксен, оливин, кальцит [Кочарян и др., 2023; Boulton et al., 2012; Volpe et al., 2022]. Для материалов, характеризующихся свойством скоростного разупрочнения, сопротивление сдвигу уменьшается с ростом скорости деформации [Dieterich, 1979]. Подвижки по таким разломам локализуются в узкой зоне шириной до нескольких сантиметров [например, Chester et al., 2004; Sibson, 2003; Smith et al., 2013]. На сегментах разлома с асейсмическим скольжением, осевая зона представляет собой широкую зону распределенных деформаций и сложена горными породами с низким коэффициентом трения и свойством скоростного упрочнения (сопротивление сдвигу растет с увеличением скорости деформации), такими как, мрамор, хлорит, серицит [Collettini et al., 2019; Ikari et al., 2011; Volpe et al., 2022]. В то же время большинство разломов имеют пространственно неоднородную структуру осевой зоны, включающую компетентные блоки и некомпетентные слои, которые сложены горными породами с различными фрикционными свойствами. Зоны распределенных деформаций формируются в пределах некомпетентных слоев со свойством скоростного упрочнения. Локализованные разрывы фиксируются на границе компетентного блока, сложенного породами со свойством скоростного разупрочнения, и некомпетентного слоя [Fagereng and Sibson, 2010]. Для таких участков характерны подвижки с низкой скоростью распространения разрыва – медленные землетрясения [Гридин и др., 2025].

Невозможность прямого изучения структуры разлома на сейсмогенной глубине делает особо актуальным разработку методов сейсмического мониторинга, позволяющих косвенно судить о структурных особенностях разломов. Процесс образования трещин или скольжение по уже сформированным структурным нарушениям сопровождается излучением упругих колебаний в широком диапазоне частот, а строение массива и тип разработки массива горных пород влияет на характеристики излучения. Для детального изучения процессов, происходящих в зоне разлома, проводят оценку параметров сейсмических событий, скейлинговых соотношений и выделяют особенности волновой формы [Kwiitek et al., 2011; Li et al., 2017; Oye, 2005; Richardson, 2002]. Так же для определения особенностей протекающих процессов применяется методика классификации импульсов на основе различных определяемых параметров [Arrowsmith et al., 2006; Li et al., 2017; Ma et al., 2015].

Данная работа посвящена исследованию особенностей зарегистрированных сейсмических событий, индуцированных массовыми взрывами при разработке Коробковского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии. Массовые взрывы производились в окрестности нескольких сегментов разлома. На участках локализации сейсмических событий изучена структура разлома и отобраны образцы горных пород. Сопоставление данных сейсмического мониторинга и геологического обследования разломной зоны позволило косвенно подтвердить влияние структуры и вещественного состава породы на параметры сейсмических событий и тип реализуемых динамических подвижек.

Объект исследования

Исследование проводилось на шахте им. Губкина Коробковского железорудного месторождения (АО «Комбинат КМАруда») Старо-Оскольского рудного узла Курской магнитной аномалии. Коробковское месторождение железистых кварцитов приурочено к южному замыканию Тим-Ястребовского синклиория. В пределах месторождения наиболее древними структурами являются Коробковская и Стретенская антиклинали, сложенные архейскими породами. По данным разведочного бурения интенсивное дробление и расщепление пород прослежено на контакте Стретенской залежи железистых кварцитов, называемой Северо-Восточным разломом.

В пределах месторождения наблюдается существенное превышение горизонтальных напряжений над вертикальными [Кочарян и др., 2018], что определяет данный массив как потенциально удароопасный, с возможностью риска возникновения крупных сейсмических событий.

Разработка месторождения ведется подземным способом с применением короткозамедленного взрывания и этажно-камерной системы разработки. Суммарная масса взрывчатых веществ (ВВ) в камере составляет, в среднем, 10–20 т. Камеры находятся на глубине 245–285 м от дневной поверхности. Схема исследуемой части Коробковского железорудного месторождения представлена на рис. 1.

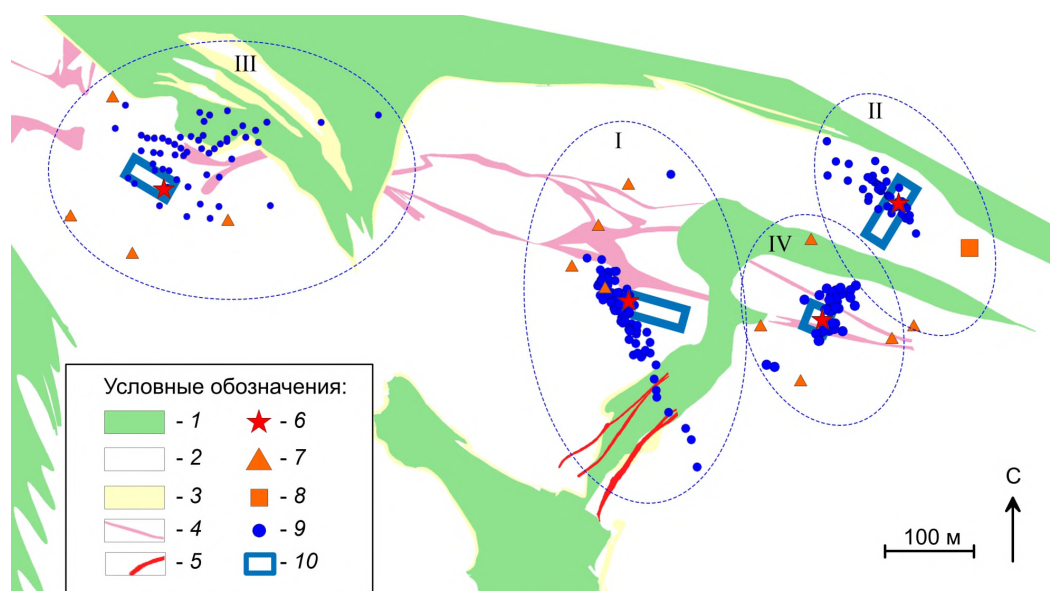


Рис. 1. Исследуемый участок Коробковского железорудного месторождения. I, II, III, IV – исследуемые области взрывов, произведенные 06.07.2019 г. и 24.10.2020 г., 12.11.2022 г. и 16.12.2023 г., соответственно. 1 – сланцевая свита, 2 – железорудная свита, 3 – безрудные или слаборудные кварциты, 4 – тело разлома, 5 – жильные образования, 6 – расположение взрывной камеры, 7 – измерительные пункты, оснащенные однокомпонентными датчиками ускорений, 8 – измерительные пункты, оснащенные трехкомпонентными датчиками ускорений, 9 – лоцированные сейсмические события, 10 – схематичное положение разрабатываемых камер.

Сейсмический мониторинг

Целью сейсмического мониторинга была регистрация микросейсмических событий, индуцированных массовыми взрывами на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии. Для каждого взрыва измерения проводились с помощью сейсмической группы, состоящей из 4 измерительных точек, оборудованных акселерометрами Brüel & Kjær 8306 и Dytran 3191A1 с рабочей полосой частот 0,08 Гц–1 кГц и частотой опроса 10 кГц. Регистрация велась на 14-разрядное АЦП E14-440 L-Card и 16-разрядное АЦП National Instruments USB-6216 BNC. Однокомпонентные датчики крепились к стенке выработки таким образом, что ось датчика была горизонтальна. Анализируемые события были зарегистрированы после массовых взрывов в период прекращения горных и строительно-монтажных работ. Особенности расположения измерительных точек потребовали регистрации на несколько АЦП и применения различных способов синхронизации данных. В первом случае на отдельный канал регистрации велась запись временной метки для контроля частоты опроса АЦП, во втором проводилась запись одного канала регистрации на два АЦП.

Определение момента времени вступления P -волны проводилось по превышению порога спектральной амплитуды квадрата ускорения в окне длительностью 0,05 с (перекрывание 50% в полосе частот 80–1000 Гц). Далее уточнение времени первого вступления выполнялось с помощью информационного критерия Акаике (AIC) [Carpinteri et al., 2012]. В двухинтервальной модели AIC сигнала рассчитывался в скользящем окне 2 мс согласно следующему выражению:

$$\text{AIC}(k) = k \lg\{S(A[1, k])\} + (N - k - 1) \lg\{S(A[k + 1, N])\},$$

где N – длина окна, k – момент, разделяющий окно на два интервала, S – дисперсия. Момент времени, при котором величина AIC принимает минимальное значение, интерпретируется как момент вступления волны.

Для каждого обнаруженного сигнала (рис. 2) определялось время прихода волны на станцию. Локация сейсмических событий проводилась с помощью метода засечек. Система уравнений решалась методом Ньютона. Количество итераций не превышало 150. Более подробное описание методов детектирования и локации представлено в работе [Беседина и др., 2020].

Для всех зарегистрированных событий определялись очаговые параметры: скалярный сейсмический момент M_0 , угловая частота f_0 и сейсмическая энергия E_s . Скалярный сейсмический момент был рассчитан согласно соотношению [Кейлис-Борок, 1957] в модификации [Gibowicz and Kijko, 2013]:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho C^3 R\Omega_0}{F_c R_c S_c},$$

где ρ – плотность массива ($\rho = 3400$ кг/м³); C – скорость распространения волн ($C_\alpha = 5570$ м/с, $C_\beta = 3130$ м/с); R – расстояние от источника до точки наблюдения; Ω_0 – амплитуда «полки» в низкочастотной части спектра смещения; F_c – коэффициент, учитывающий направленность излучения; R_c – коэффициент, определяемый углом выхода луча на свободную поверхность; S_c – станционная поправка. При отсутствии информации о механизме источника можно проводить оценку сейсмического момента, используя среднеквадратичное значение коэффициента F_c , а R_c принимается равным 1, т.к. для датчиков, расположенных в подземных выработках, можно пренебречь станционной поправкой и коэффициентом, который учитывает угол выхода луча на свободную поверхность [Gibowicz and Kijko, 2013]. По величине сейсмического момента M_0 можно оценить моментную магнитуду M_w [Hanks and Kanamori, 1979; Kanamori, 1977]:

$$M_w = \frac{2}{3}(\lg M_0 - 9,1).$$

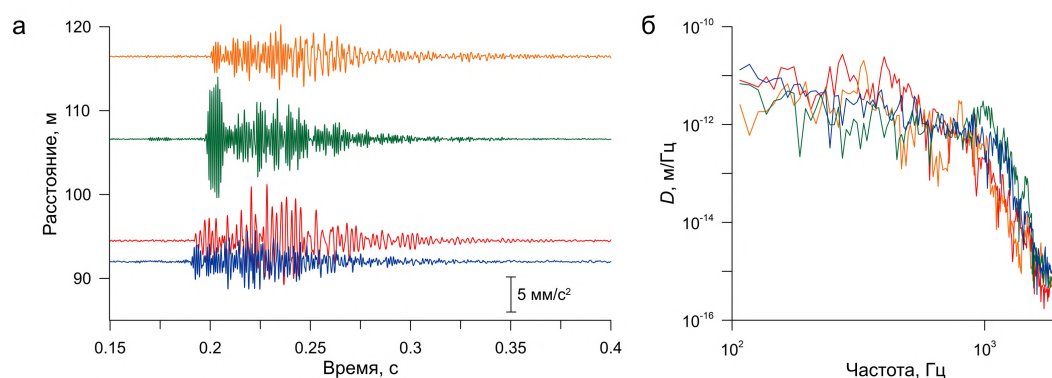


Рис. 2. Пример акселерограмм сейсмического события, зарегистрированного после взрыва 16.12.2023 г. в нескольких точках на различных расстояниях (а) и их спектры (б).

Угловая частота f_0 определялась согласно модели Брюна [Brune, 1970], для которой спектр смещения описывается функцией:

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

Излученная сейсмическая энергия E_s оценивалась с помощью интегрирования квадрата спектра скорости:

$$E_s = 4\pi\rho C \frac{\sum_n J_{c_n} R_n^2}{n},$$

где n – количество точек измерения, R_n – расстояние между источником и n -й измерительной станцией, J_{c_n} – поток энергии, определяемый через квадрат модуля спектра скорости $|V(f)|$.

В результате детектирования и локации был сформирован каталог, который включал в себя следующие данные о сейсмических событиях: сейсмический момент M_0 , угловая частота f_0 , излученная сейсмическая энергия E_s , длительность T и координаты.

Для полученных каталогов была выполнена кластеризация всех импульсов на две подгруппы с использованием метода КЛАСИ-к [Морозова и др., 2022], который был разработан для выделения в ансамбле микросейсмических событий подмножеств, характеризующихся различными скейлинговыми соотношениями ($E_s(M_0)$ и $T(M_0)$) и основан на алгоритме кластеризации k -средних.

Результаты сейсмического мониторинга

После взрыва количество регистрируемых сейсмических событий многократно увеличивается. В потоке сейсмических событий можно выделить две подгруппы импульсов (рис. 3). Подгруппа событий с более высокими значениями приведенной сейсмической энергии E_s/M_0 характеризуется меньшими временами в очаге при одинаковой величине сейсмического момента M_0 . При этом статистика всех подгрупп подчиняется закону повторяемости Гутенберга – Рихтера, а активность – закону Омори. Выявить какую-либо временную закономерность инициирования сейсмических событий из различных подгрупп не удастся.

Параметр b -value распределения Гутенберга – Рихтера был рассчитан с помощью алгоритма ZMAP [Wiemer, 2001]. Характерные значения приведенной сейсмической энергии и параметра b -value различных подгрупп событий представлены в табл. 1. Для всех подгрупп вычисленные значения приведенной сейсмической энергии соответствуют классу низкочастотных и очень низкочастотных землетрясений. Для отдельных подгрупп средние значения приведенной сейсмической энергии отличаются в 4–9 раз. Вариации наблюдаются и в значениях b -value. Для ансамбля сейсмических событий, инициированных взрывом в массиве, b -value для двух подгрупп близки по значениям

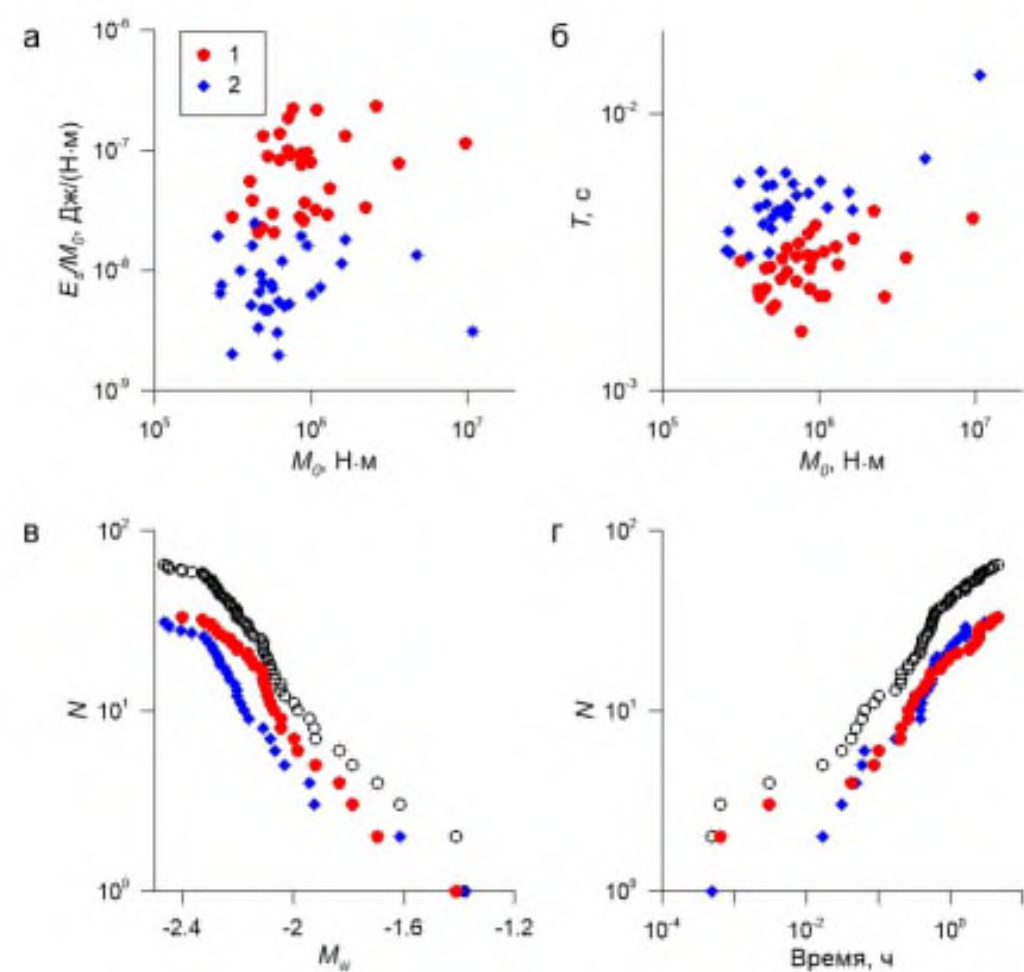


Рис. 3. Характеристики сейсмических событий, зарегистрированных после массового взрыва 12.11.2022 г. Красным и синим цветом (цифры 1 и 2 соответственно) отмечены подгруппы событий, выделенные на основе КЛАСИ-к алгоритма, белым цветом – полный ансамбль зарегистрированных событий. а) зависимость приведенной сейсмической энергии от сейсмического момента; б) зависимость длительности событий от сейсмического момента; в) график повторяемости сейсмических событий. Полный ансамбль событий описывается соотношением $\lg N = -2,2 - 1,7M_w$, где N – кумулятивное количество событий, M_w – моментная магнитуда; г) изменение количества зарегистрированных событий в зависимости от времени после взрыва. Изменение количества полного ансамбля событий описывается соотношением $N(t) = 40 + 17\ln(t + 10^{-3})$, где t – время после взрыва.

и меньше 2 (взрыв II), в то время как для событий после взрывов в окрестности разлома характерная величина b -value больше 2 (взрыв I, III, IV).

Таблица 1. Статистические параметры сейсмических событий, инициированных массовыми взрывами

№ взрыва	E_s/M_0 , Дж/(Н·м)		b -value	
	Подгруппа 1	Подгруппа 2	Подгруппа 1	Подгруппа 2
I	$(1,8 \pm 1,1) \times 10^{-7}$	$(4,7 \pm 2,0) \times 10^{-8}$	$2,1 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,3$
II	$(3,4 \pm 2,3) \times 10^{-7}$	$(4,8 \pm 3,4) \times 10^{-8}$	$1,5 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$
III	$(8,2 \pm 6,2) \times 10^{-8}$	$(8,9 \pm 5,9) \times 10^{-9}$	$2,0 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,4$
IV	$(4,9 \pm 4,6) \times 10^{-7}$	$(7,2 \pm 5,5) \times 10^{-8}$	$1,6 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,8$

Структурные особенности осевой зоны Северо-Восточного разлома

Низкие значения приведенной сейсмической энергии E_s/M_0 , а, следовательно, и низкая излучательная эффективность сейсмических событий может быть обусловлена структурой осевой зоны Северо-Восточного разлома. В ходе полевых изысканий были изучены сегменты разлома, в пределах которых локализовались сейсмические события. В ходе обследования были отобраны образцы горных пород, слагающих ядро разлома и вмещающий массив, после чего выполнялось их петрографическое изучение. Северо-Восточный разлом разделяет несколько крупных региональных блоков, сложенных железистым кварцитом, при этом визуальное обследование разлома указывает на его неоднородную структуру (рис. 4).

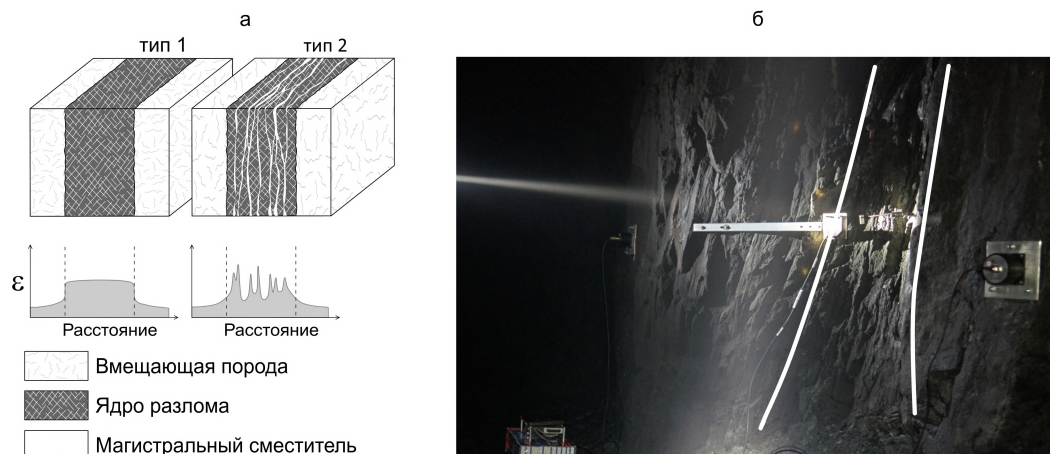


Рис. 4. Структура Северо-Восточного разлома. а) схематичное строение ядра разлома с равномерным распределением деформаций ε вкrest простирания (тип 1) и с пространственно неоднородным накоплением деформаций вкrest простирания с формированием множественных магистральных сместителей (тип 2); б) фото одного из участков локализации магистрального сместителя (границы отмечены белыми линиями).

Вмещающий массив представляет собой монолит, практически не затронутый процессами дифференциации минеральных агрегатов. Это плотная порода, состоящая из лентообразных полос, сложенных кварц-магнетитовыми агрегатами и кальцитом, вытянутыми в одном направлении, причем, кристаллические агрегаты кварца образуют самостоятельные обособленные ленты, сопрягающиеся с полосами магнетитовых агрегатных срастаний. Кальцит распределен преимущественно в межзерновом пространстве кварцевых агрегатов, а также образует отдельные очаговые выделения. Хлорит-амфиболовые срастания располагаются в направлении сланцеватости, придавая дополнительную прочность породе. Вещественный состав демонстрирует наличие как минеральных фаз, характеризующихся как скоростным разупрочнением (магнетит, кварц, амфиболит), так скоростным упрочнением (кальцит, хлорит) [Buijze et al., 2021; Ikari et al., 2011].

В пределах шахтного поля можно выделить сегменты разлома, которые характеризуются различными закономерностями накопления деформаций (рис. 4а). В зоне взрыва (I) выделяется большое количество магистральных сместителей (тип 2) и деформации накапливаются неравномерно вкrest простирания. Ширина ядра составляет около 200 м. В этой зоне ядро представляет собой зону дробления железистого кварцита по множеству плоскостей до состояния брекчии с привнесом карбонатного материала (рис. 5а). Наблюдается выход флюида по трещинам. Магистральные сместители сложены катакластическим веществом высокой стадии деформации. Преобладающим минералом является хлорит, который образует тончайшие агрегаты с размером индивидуальных частиц не более 10 мкм. Биотит содержится в количестве первых процентов и срастается с хлоритовыми агрегатами. Все это пронизано пылеватыми частицами

органического вещества, преобладающий размер которых порядка 1 мкм. Для геоматериалов, слагающих магистральные сместители, характерно скоростное упрочнение.

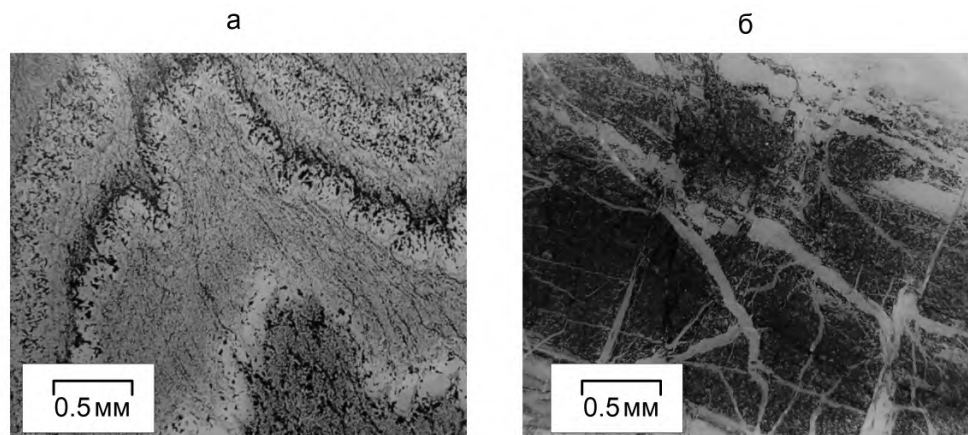


Рис. 5. Примеры фотографий шлифов, отобранных из зон локализации ядра разлома. а) брекчия по железистому кварциту (зона взрыва I); б) катаклазит по железистому кварцитосланцу с примесью хлорит-биотитовых агрегатов (зона взрыва III).

В зоне взрыва III (тип 1) происходит смятие железистого кварцита (рис. 5б) с образованием складок, с образованием мусковита по направлениям деформаций. Катакластическое вещество, видимое в ядре разлома, содержит примеси хлорит-биотитовых агрегатов, придающих породе дополнительную «вязкость», в результате чего порода при сжатии становится более пластичной. Ядро разлома представляет собой контакт смятого в складки железистого кварцита и хлоритового сланца. Поскольку породы имеют разные прочностные характеристики, порода разрушается до бластомилонита с образованием матрикса. В процессе тектонического воздействия при образовании бластокатаклазита были созданы *P-T* условия, обуславливающие метаморфический процесс с образованием таких минералов, как мусковит и эпидот, присутствие которых в матриксе уменьшает прочность горной породы. Для геоматериалов, слагающих ядро разлома в зоне взрыва III, характерно только скоростное упрочнение.

В зоне взрыва IV (тип 1) ядро разлома слабо выражено. Данная зона представляет собой контакт зоны дробления джаспелита, и хлоритового сланца, шириной до 100 м. Магистральные сместители не проявлены. В данной зоне наблюдается смятие сланцев на расстоянии от 10 до 50 м от контакта и дробление кварцитов, шириной от 5 до 15 м. Присутствие широкого блока хлоритового сланца (до 100 м) снижает прочность рассматриваемой зоны, относительно вмещающего массива.

Таким образом, на всех изученных сегментах Северо-Восточного разлома осевая зона сложена породами преимущественно со свойством скоростного упрочнения.

Обсуждение

Сегменты разломов, которые потенциально склонны к сейсмогенному проскальзыванию, находятся в субкритическом напряженном состоянии в региональном поле напряжений и сложены породами со свойством скоростного разупрочнения [Walsh and Zoback, 2016]. Продолжительная разработка месторождений (выемка и перемещение породы) вызывает изменение напряженного состояния среды и приближает предварительно напряженный разлом к пределу прочности и инициированию разрыва [Kocharyan et al., 2022]. Случайно инициированный эндогенным или экзогенным воздействием динамический разрыв может активировать как небольшой локальный участок сегмента разлома, так и весь сегмент полностью, или даже распространиться на соседний сегмент, если уровень напряжений близок к предельному [Scholz, 2010; Tinti et al., 2021]. В данном случае взрывы в массиве не оказывают существенного влияния на разлом [Кочарян и др., 2019].

В условиях локализации взрывов в зоне разломов наблюдается существенно другая ситуация. Результаты проведенного мониторинга (рис. 1) показывают, что после массовых взрывов, локализованных в зоне разлома, зарегистрирован поток сейсмических событий с магнитудой от $-2,4 \dots -1,2$ на расстояниях до 500 м от взрывной камеры, что может говорить об активизации локальных сегментов разлома. Полученные значения магнитуд соответствуют подвижкам по трещинам длиной около 1–10 м. В условиях, когда наблюдается частичная активизация отдельных сегментов, могут создаваться условия, при которых будет инициирован динамический разрыв, охватывающий несколько соседних сегментов [Locchi et al., 2024].

Оценка сейсмической опасности и параметров возможных землетрясений основывается на статистических методах анализа каталогов землетрясений, что в условиях слабой сейсмичности региона может давать некорректные оценки [Шебалин и др., 2022]. Учитывая, что при напряжениях близких к критическим, повторяющиеся динамические воздействия способны инициировать подвижку по разлому [Kocharyan et al., 2018], необходимо совершенствование методов, направленных на определение параметров возможных сейсмических событий. В рамках проведенной работы сделана попытка дополнить результаты сейсмического мониторинга данными геологических изысканий.

Статистические свойства регистрируемых после взрывов потоков сейсмических событий имеет ряд особенностей. Показано, что углы наклона графиков повторяемости регистрируемых сейсмических событий имеют большее значение, чем в случае естественной сейсмичности ($b \approx 1$), что характерно для шахтной сейсмичности и согласуется с результатами других исследований [Змушко и др., 2011; Gibowicz and Kijko, 2013; Oye, 2005]. При этом кластеризация сейсмических событий на подгруппы, которые характеризуются различной величиной приведенной сейсмической энергии, не позволяет выявить существенных различий в величине b -value. Вышепредставленное обстоятельство, согласно результатам лабораторных экспериментов, может свидетельствовать об относительной стабильности рассматриваемого разлома [Ostapchuk et al., 2021].

Изучение очаговых параметров слабой сейсмичности дает важную дополнительную информацию о склонности сегмента разлома к динамическим сейсмогенным подвижкам. Важной особенностью регистрируемых сейсмических событий на исследуемом участке, является их низкая излучательная эффективность (табл. 1). Для всех событий величина приведенной сейсмической энергии соответствует классу низкочастотных и очень низкочастотных землетрясений. Данное обстоятельство является существенным при оценке сейсмической опасности, так как медленные землетрясения не вызывают разрушений на дневной поверхности и практически не ощущаются людьми. Однако кратковременность сейсмического мониторинга не позволяет надежно утверждать о типе потенциально реализуемых на разломе землетрясений, и требуется привлечение дополнительной информации [Шебалин и др., 2022].

Анализ сейсмичности может выявить структурные особенности активных сегментов разломов и особенности локализации деформаций [Chalumeau et al., 2024; Collettini et al., 2022]. Наличие взаимосвязи между особенностями сейсмического режима, структурными и реологическими свойствами разломов позволяет, с другой стороны, восполнять недостаточный объем сейсмических данных геологической информацией. Как показал проведенный анализ, выделенные особенности очаговых параметров могут в полной мере быть обусловлены реологическими свойствами ядра разлома. Зоны локализации деформаций, сложенные породами со свойством скоростного упрочнения, накапливают деформации преимущественно асейсмично. Кроме того, выявленная структура сегментов разлома также характерна для асейсмичного накопления деформаций (рис. 4а, тип 1) или посредством подвижек с низкой излучательной эффективностью (рис. 4а, тип 2) [Гридин и др., 2025; Fagereng and Sibson, 2010]. Следовательно, объединение данных сейсмического мониторинга и сведений о структурных и реологических свойствах локальных сегментов разломов позволяет делать более обоснованные выводы о сейсмичности активизированного сегмента разлома.

По результатам проведенных комплексных исследований можно полагать, что Северо-Восточный разлом в пределах шахтного поля может реализовывать накопленные деформации посредством преимущественно медленных асейсмичных подвижек.

Благодарности. Проведение сейсмического мониторинга и коллекционирование всех данных выполнено в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (темы № 122032900178-7 и № 122032900172-5). Проведение геологического изучения тектонического разлома и построение пространственно неоднородной модели разлома выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-10087).

Список литературы

- Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г. и др. Характеристики слабой сейсмичности, индуцированной горными работами на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 3. — С. 12–24. — DOI: [10.15372/ftprpi20200302](https://doi.org/10.15372/ftprpi20200302).
- Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А. и др. Особенности развития процессов деформирования и микро-сейсмической эмиссии при нагружении образцов горных пород до разрушения // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2, № 3. — С. 45–49. — EDN: VXLLAX.
- Гиляров В. Л., Дамаскинская Е. Е., Кадомцев А. Г. и др. Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении «Антей» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 3. — С. 40–45. — EDN: SMIDIP.
- Гридин Г. А., Остапчук А. А., Григорьева А. В. и др. Вариации структурных и физико-механических свойств тектонического разлома в приповерхностной зоне // Физика Земли. — 2025. — № 1. — В печати.
- Захаров В. Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. — Москва : ИГД им. А. А. Скочинского, 2002. — 172 с.
- Змушко Т. Ю., Турунтаев С. Б. и Куликов В. И. Связь шахтной сейсмичности с режимом горных работ на шахтах Воркуты // Динамические процессы в геосферах. — 2011. — № 2. — С. 75–88. — EDN: TMYUCR.
- Кейлис-Борок В. И. Исследование механизма землетрясений. — Москва : АН СССР, 1957. — 148 с.
- Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — Москва : ГЕОС, 2016. — 432 с.
- Кочарян Г. Г., Беседина А. Н., Гридин Г. А. и др. Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса // Физика Земли. — 2023. — № 3. — С. 3–32. — DOI: [10.31857/S0002333723030067](https://doi.org/10.31857/S0002333723030067).
- Кочарян Г. Г., Будков А. М. и Кишкина С. Б. Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 4. — С. 34–44. — DOI: [10.15372/FTPRPI20180405](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180405).
- Кочарян Г. Г., Куликов В. И. и Павлов Д. В. О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 6. — DOI: [10.15372/FTPRPI20190605](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190605).
- Лавров А. В. и Шкуратник В. Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. — 2005. — Т. 51. — С. 6–18. — EDN: HSIMXL.
- Лобацкая Р. М. Зоны динамического влияния разломов по анализу сопутствующих разрывов // Геология и геофизика. — 1983. — № 6. — С. 53–61.
- Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 4. — С. 68–73. — EDN: RADOWD.
- Морозова К. Г., Остапчук А. А., Беседина А. Н. и др. Классификация сейсмических событий, сопровождающих взрывной способ разработки массива горных пород // Сейсмические приборы. — 2022. — Т. 58, № 4. — С. 97–110. — DOI: [10.21455/si2022.4-6](https://doi.org/10.21455/si2022.4-6).
- Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н. и др. О некоторых особенностях эволюции напряженнодеформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 5. — С. 3–19. — EDN: RFSKVN.
- Патонин А. В., Шихова Н. М., Пономарев А. В. и др. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород // Сейсмические приборы. — 2018. — Т. 54, № 3. — С. 35–55. — DOI: [10.21455/si2018.3-3](https://doi.org/10.21455/si2018.3-3).

- Смирнов В. Б., Пономарев А. В. и Завьялов А. Д. Структура акустического режима в образцах горных пород и сейсмический режим // Физика Земли. — 1995. — № 1. — С. 38–58. — EDN: XGWLWZ.
- Шебалин П. Н., Гвишиани А. Д., Дзедобов Б. А. и др. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 507, № 7. — С. 91–97. — DOI: [10.31857/S2686739722601466](https://doi.org/10.31857/S2686739722601466).
- Шерман С. И., Борняков С. А. и Буддо В. Ю. Области динамического влияния разломов. — Новосибирск : Наука, 1983. — 112 с.
- Шкуратник В. Л. и Вознесенский А. С. Акустическая эмиссия ультразвукового диапазона частот как инструмент решения задач горной геофизики // Горный журнал. — 2009. — № 1. — С. 54–57. — EDN: LHOUDT.
- Adushkin V. V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass // Russian Geology and Geophysics. — 2018. — Vol. 59, no. 5. — P. 571–583. — DOI: [10.1016/j.rgg.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.04.010).
- Arrowsmith S. J., Arrowsmith M. D., Hedlin M. A. H., *et al.* Discrimination of Delay-Fired Mine Blasts in Wyoming Using an Automatic Time-Frequency Discriminant // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2006. — Vol. 96, no. 6. — P. 2368–2382. — DOI: [10.1785/0120060039](https://doi.org/10.1785/0120060039).
- Bolton D. C., Shokouhi P., Rouet-Leduc B., *et al.* Characterizing Acoustic Signals and Searching for Precursors during the Laboratory Seismic Cycle Using Unsupervised Machine Learning // Seismological Research Letters. — 2019. — Vol. 90, no. 3. — P. 1088–1098. — DOI: [10.1785/0220180367](https://doi.org/10.1785/0220180367).
- Boulton C., Carpenter B. M., Toy V., *et al.* Physical properties of surface outcrop cataclastic fault rocks, Alpine Fault, New Zealand // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. — 2012. — Vol. 13, no. 1. — DOI: [10.1029/2011GC003872](https://doi.org/10.1029/2011GC003872).
- Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. — 1970. — Vol. 75, no. 26. — P. 4997–5009. — DOI: [10.1029/JB075i026p04997](https://doi.org/10.1029/JB075i026p04997).
- Buijze L., Guo Y., Niemeijer A. R., *et al.* Effects of heterogeneous gouge segments on the slip behavior of experimental faults at dm scale // Earth and Planetary Science Letters. — 2021. — Vol. 554. — P. 116652. — DOI: [10.1016/j.epsl.2020.116652](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116652).
- Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., *et al.* Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // Cement and Concrete Composites. — 2012. — Vol. 34, no. 4. — P. 529–537. — DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2011.11.013](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.013).
- Chalumeau C., Agurto-Detzel H., Rietbrock A., *et al.* Seismological evidence for a multifault network at the subduction interface // Nature. — 2024. — Vol. 628, no. 8008. — P. 558–562. — DOI: [10.1038/s41586-024-07245-y](https://doi.org/10.1038/s41586-024-07245-y).
- Chester F. M., Chester J. S., Kirschner D. L., *et al.* 8. Structure of Large-Displacement, Strike-Slip Fault Zones in the Brittle Continental Crust // Rheology and Deformation of the Lithosphere at Continental Margins. — Columbia University Press, 2004. — P. 223–260. — DOI: [10.7312/karn12738-009](https://doi.org/10.7312/karn12738-009).
- Collettini C., Barchi M. R., De Paola N., *et al.* Rock and fault rheology explain differences between on fault and distributed seismicity // Nature Communications. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — DOI: [10.1038/s41467-022-33373-y](https://doi.org/10.1038/s41467-022-33373-y).
- Collettini C., Tesei T., Scuderi M. M., *et al.* Beyond Byerlee friction, weak faults and implications for slip behavior // Earth and Planetary Science Letters. — 2019. — Vol. 519. — P. 245–263. — DOI: [10.1016/j.epsl.2019.05.011](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.05.011).
- Dieterich J. H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 1979. — Vol. 84, B5. — P. 2161–2168. — DOI: [10.1029/JB084iB05p02161](https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02161).
- Dixon N., Smith A., Flint J. A., *et al.* An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries // Landslides. — 2018. — Vol. 15, no. 8. — P. 1631–1644. — DOI: [10.1007/s10346-018-0977-1](https://doi.org/10.1007/s10346-018-0977-1).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., *et al.* The technogenic Bachat earthquake of June 18, 2013 (ML = 6.1) in the Kuznetsk Basin—the world's strongest in the extraction of solid minerals // Seismic Instruments. — 2017. — Vol. 53, no. 4. — P. 333–355. — DOI: [10.3103/S0747923917040041](https://doi.org/10.3103/S0747923917040041).
- Fagereng A. and Sibson R. H. Mélange rheology and seismic style // Geology. — 2010. — Vol. 38, no. 8. — P. 751–754. — DOI: [10.1130/G30868.1](https://doi.org/10.1130/G30868.1).
- Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., *et al.* Global review of human-induced earthquakes // Earth-Science Reviews. — 2018. — Vol. 178. — P. 438–514. — DOI: [10.1016/j.earscirev.2017.07.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008).
- Gibowicz S. J. and Kijko A. Introduction to Mining Seismology / ed. by R. Dmowska. — Elsevier Science & Technology Books, 2013.
- Hanks T. C. and Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 1979. — Vol. 84, B5. — P. 2348–2350. — DOI: [10.1029/JB084iB05p02348](https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348).
- Ikari M. J., Marone Ch. and Saffer D. M. On the relation between fault strength and frictional stability // Geology. — 2011. — Vol. 39, no. 1. — P. 83–86. — DOI: [10.1130/g31416.1](https://doi.org/10.1130/g31416.1).

- Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. — 1977. — Vol. 82, no. 20. — P. 2981–2987. — DOI: [10.1029/JB082i020p02981](https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981).
- Kocharyan G., Qi Ch., Kishkina S., *et al.* Potential triggers for large earthquakes in open-pit mines: A case study from Kuzbass, Siberia // *Deep Underground Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 1, no. 2. — P. 101–115. — DOI: [10.1002/dug2.12028](https://doi.org/10.1002/dug2.12028).
- Kocharyan G. G., Ostapchuk A. A., Pavlov D. V., *et al.* The Effects of Weak Dynamic Pulses on the Slip Dynamics of a Laboratory Fault // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2018. — Vol. 108, 5B. — P. 2983–2992. — DOI: [10.1785/0120170363](https://doi.org/10.1785/0120170363).
- Kwiatek G., Plenkers K. and Dresen G. Source Parameters of Pico-seismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2011. — Vol. 101, no. 6. — P. 2592–2608. — DOI: [10.1785/0120110094](https://doi.org/10.1785/0120110094).
- Li B., Li N., Wang E., *et al.* Discriminant Model of Coal Mining Microseismic and Blasting Signals Based on Waveform Characteristics // *Shock and Vibration*. — 2017. — Vol. 2017. — P. 1–13. — DOI: [10.1155/2017/6059239](https://doi.org/10.1155/2017/6059239).
- Locchi M. E., Scognamiglio L., Tinti E., *et al.* A large fault partially reactivated during two contiguous seismic sequences in Central Italy: The role of geometrical and frictional heterogeneities // *Tectonophysics*. — 2024. — Vol. 877. — P. 230284. — DOI: [10.1016/j.tecto.2024.230284](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230284).
- Lu C.-P., Liu Y., Zhang N., *et al.* In-situ and experimental investigations of rockburst precursor and prevention induced by fault slip // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. — 2018. — Vol. 108. — P. 86–95. — DOI: [10.1016/j.ijrmms.2018.06.002](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.002).
- Ma J., Zhao G., Dong L., *et al.* A Comparison of Mine Seismic Discriminators Based on Features of Source Parameters to Waveform Characteristics // *Shock and Vibration*. — 2015. — Vol. 2015. — P. 1–10. — DOI: [10.1155/2015/919143](https://doi.org/10.1155/2015/919143).
- Ostapchuk A., Morozova K., Markov V., *et al.* Acoustic Emission Reveals Multiple Slip Modes on a Frictional Fault // *Frontiers in Earth Science*. — 2021. — Vol. 9. — DOI: [10.3389/feart.2021.657487](https://doi.org/10.3389/feart.2021.657487).
- Oye V. Source Parameters and Scaling Relations for Mining-Related Seismicity within the Pyhasalmi Ore Mine, Finland // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2005. — Vol. 95, no. 3. — P. 1011–1026. — DOI: [10.1785/0120040170](https://doi.org/10.1785/0120040170).
- Richardson E. Seismicity in Deep Gold Mines of South Africa: Implications for Tectonic Earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2002. — Vol. 92, no. 5. — P. 1766–1782. — DOI: [10.1785/0120000226](https://doi.org/10.1785/0120000226).
- Scholz C. H. Large Earthquake Triggering, Clustering, and the Synchronization of Faults // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2010. — Vol. 100, no. 3. — P. 901–909. — DOI: [10.1785/0120090309](https://doi.org/10.1785/0120090309).
- Sibson R. H. Thickness of the Seismic Slip Zone // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2003. — Vol. 93, no. 3. — P. 1169–1178. — DOI: [10.1785/0120020061](https://doi.org/10.1785/0120020061).
- Smith S. A. F., Bistacchi A., Mitchell T. M., *et al.* The structure of an exhumed intraplate seismogenic fault in crystalline basement // *Tectonophysics*. — 2013. — Vol. 599. — P. 29–44. — DOI: [10.1016/j.tecto.2013.03.031](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.031).
- Tinti E., Casarotti E., Ulrich T., *et al.* Constraining families of dynamic models using geological, geodetic and strong ground motion data: The Mw 6.5, October 30th, 2016, Norcia earthquake, Italy // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2021. — Vol. 576. — P. 117237. — DOI: [10.1016/j.epsl.2021.117237](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117237).
- Volpe G., Pozzi G. and Collettini C. Y-B-P-R or S-C-C'? Suggestion for the nomenclature of experimental brittle fault fabric in phyllosilicate-granular mixtures // *Journal of Structural Geology*. — 2022. — Vol. 165. — P. 104743. — DOI: [10.1016/j.jsg.2022.104743](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104743).
- Walsh F. R. and Zoback M. D. Probabilistic assessment of potential fault slip related to injection-induced earthquakes: Application to north-central Oklahoma, USA // *Geology*. — 2016. — Vol. 44, no. 12. — P. 991–994. — DOI: [10.1130/G38275.1](https://doi.org/10.1130/G38275.1).
- Wiemer S. A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP // *Seismological Research Letters*. — 2001. — Vol. 72, no. 3. — P. 373–382. — DOI: [10.1785/gssrl.72.3.373](https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373).

FEATURES OF SEISMICITY TRIGGERED BY RIPPLE-FIRED EXPLOSIONS AT THE KOROBKOVSKOYE IRON ORE DEPOSIT

A. A. Ostapchuk^{*,1,2} , K. G. Morozova¹ , A. N. Besedina¹ ,
G. A. Gridin^{1,2} , A. V. Grygoryeva^{1,3}, and D. V. Pavlov¹ 

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³Institute of Geology of Ore Deposits Petrography Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

****Correspondence to:** Alexey Ostapchuk, ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Intensification of mining activities often lead to nucleation of strong earthquakes and fault-slip bursts in areas that were previously thought to be aseismic or of low seismicity. Triggering strong seismic events associates with slips on existing tectonic faults and large fractures, whose structures essentially alter along strike. This work analyzes parameters of mine seismicity at the Korobkovskoye iron ore deposit, within which the large North-Eastern fault is localized. The goal of this analysis is to assess the probability of triggering strong seismic events at the fault segments with different structures of the core. The technique of ripple-fired blasting and horizon mining are employed in developing the deposit. This provokes weak seismic activity within the mine field. When explosions are hold in host rock, seismic events localize within the blasted chamber. The magnitude statistics displays distribution that obeys a power law, and the scaling exponent b -value, as a rule, is less than 2. When explosions are hold in the vicinity of the fault, seismic events localize along its trace, and the b -value, as a rule, exceeds 2. The main feature of seismicity at the Korobkovskoye iron ore deposit is that the induced events are of low radiative efficiency of $8,9 \times 10^{-9} - 4,9 \times 10^{-7}$ J/(N·m), which corresponds to “slow earthquakes”. The core of the North-Eastern fault contains mainly velocity-strengthening rocks, causing initiation of slow slip events. It is this circumstance that probably determines initiation of slow events. Linking the data of seismic monitoring and the structural and rheological properties of materials that compose the fault core allows to suggest that within the mine field in the vicinity of the North-Eastern fault the accumulated deformations can release mainly via slow and aseismic slips.

Keywords: slow earthquakes, velocity-strengthening, mine seismicity, tectonic fault, seismic monitoring.

Citation: Ostapchuk A. A., K. G. Morozova, A. N. Besedina, G. A. Gridin, A. V. Grygoryeva, and D. V. Pavlov (2024), Features of Seismicity Triggered by Ripple-Fired Explosions at the Korobkovskoye Iron Ore Deposit, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES5013, <https://doi.org/10.2205/2024ES000941>, EDN: LEPIXG

Received: 8 May 2024

Accepted: 11 October 2024

Published: 30 December 2024



© 2024. The Authors.

References

- Adushkin V. V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass // *Russian Geology and Geophysics*. — 2018. — Vol. 59, no. 5. — P. 571–583. — DOI: [10.1016/j.rgg.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.04.010).
- Arrowsmith S. J., Arrowsmith M. D., Hedlin M. A. H., *et al.* Discrimination of Delay-Fired Mine Blasts in Wyoming Using an Automatic Time-Frequency Discriminant // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2006. — Vol. 96, no. 6. — P. 2368–2382. — DOI: [10.1785/0120060039](https://doi.org/10.1785/0120060039).
- Besedina A. N., Kishkina S. B., Kocharyan G. G., *et al.* Weak Induced Seismicity in the Korobkov Iron Ore Field of the Kursk Magnetic Anomaly // *Journal of Mining Science*. — 2020. — Vol. 56, no. 3. — P. 339–350. — DOI: [10.1134/S1062739120036818](https://doi.org/10.1134/S1062739120036818).

- Bolton D. C., Shokouhi P., Rouet-Leduc B., *et al.* Characterizing Acoustic Signals and Searching for Precursors during the Laboratory Seismic Cycle Using Unsupervised Machine Learning // *Seismological Research Letters*. — 2019. — Vol. 90, no. 3. — P. 1088–1098. — DOI: [10.1785/0220180367](https://doi.org/10.1785/0220180367).
- Boulton C., Carpenter B. M., Toy V., *et al.* Physical properties of surface outcrop cataclastic fault rocks, Alpine Fault, New Zealand // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2012. — Vol. 13, no. 1. — DOI: [10.1029/2011GC003872](https://doi.org/10.1029/2011GC003872).
- Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. — 1970. — Vol. 75, no. 26. — P. 4997–5009. — DOI: [10.1029/JB075i026p04997](https://doi.org/10.1029/JB075i026p04997).
- Buijze L., Guo Y., Niemeijer A. R., *et al.* Effects of heterogeneous gouge segments on the slip behavior of experimental faults at dm scale // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2021. — Vol. 554. — P. 116652. — DOI: [10.1016/j.epsl.2020.116652](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116652).
- Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., *et al.* Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // *Cement and Concrete Composites*. — 2012. — Vol. 34, no. 4. — P. 529–537. — DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2011.11.013](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.013).
- Chalumeau C., Agurto-Detzel H., Rietbrock A., *et al.* Seismological evidence for a multifault network at the subduction interface // *Nature*. — 2024. — Vol. 628, no. 8008. — P. 558–562. — DOI: [10.1038/s41586-024-07245-y](https://doi.org/10.1038/s41586-024-07245-y).
- Chester F. M., Chester J. S., Kirschner D. L., *et al.* 8. Structure of Large-Displacement, Strike-Slip Fault Zones in the Brittle Continental Crust // *Rheology and Deformation of the Lithosphere at Continental Margins*. — Columbia University Press, 2004. — P. 223–260. — DOI: [10.7312/karn12738-009](https://doi.org/10.7312/karn12738-009).
- Collettini C., Barchi M. R., De Paola N., *et al.* Rock and fault rheology explain differences between on fault and distributed seismicity // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — DOI: [10.1038/s41467-022-33373-y](https://doi.org/10.1038/s41467-022-33373-y).
- Collettini C., Tesei T., Scuderi M. M., *et al.* Beyond Byerlee friction, weak faults and implications for slip behavior // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2019. — Vol. 519. — P. 245–263. — DOI: [10.1016/j.epsl.2019.05.011](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.05.011).
- Dieterich J. H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 1979. — Vol. 84, B5. — P. 2161–2168. — DOI: [10.1029/JB084iB05p02161](https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02161).
- Dixon N., Smith A., Flint J. A., *et al.* An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries // *Landslides*. — 2018. — Vol. 15, no. 8. — P. 1631–1644. — DOI: [10.1007/s10346-018-0977-1](https://doi.org/10.1007/s10346-018-0977-1).
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., *et al.* The technogenic Bachat earthquake of June 18, 2013 (ML = 6.1) in the Kuznetsk Basin—the world’s strongest in the extraction of solid minerals // *Seismic Instruments*. — 2017. — Vol. 53, no. 4. — P. 333–355. — DOI: [10.3103/S0747923917040041](https://doi.org/10.3103/S0747923917040041).
- Fagereng A. and Sibson R. H. Mélange rheology and seismic style // *Geology*. — 2010. — Vol. 38, no. 8. — P. 751–754. — DOI: [10.1130/G30868.1](https://doi.org/10.1130/G30868.1).
- Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., *et al.* Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Reviews*. — 2018. — Vol. 178. — P. 438–514. — DOI: [10.1016/j.earscirev.2017.07.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008).
- Gibowicz S. J. and Kijko A. *Introduction to Mining Seismology* / ed. by R. Dmowska. — Elsevier Science & Technology Books, 2013.
- Gilyarov V. L., Damaskinskaya E. E., Kadomtsev A. G., *et al.* Analysis of statistic parameters of geoacoustic monitoring data for the Antey uranium deposit // *Journal of Mining Science*. — 2014. — Vol. 50, no. 3. — P. 443–447. — DOI: [10.1134/S1062739114030065](https://doi.org/10.1134/S1062739114030065).
- Gridin G. A., Ostapchuk A. A., Grigorieva A. V., *et al.* Variations in the structural and physical-mechanical properties of a tectonic fault in the near-surface zone // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2025. — No. 1. — In press.
- Hanks T. C. and Kanamori H. A moment magnitude scale // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 1979. — Vol. 84, B5. — P. 2348–2350. — DOI: [10.1029/JB084iB05p02348](https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348).
- Ikari M. J., Marone Ch. and Saffer D. M. On the relation between fault strength and frictional stability // *Geology*. — 2011. — Vol. 39, no. 1. — P. 83–86. — DOI: [10.1130/g31416.1](https://doi.org/10.1130/g31416.1).
- Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. — 1977. — Vol. 82, no. 20. — P. 2981–2987. — DOI: [10.1029/JB082i020p02981](https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981).
- Keilis-Borok V. I. Study of the mechanism of earthquakes. — Moscow : USSR Academy of Sciences, 1957. — P. 148.
- Kocharyan G. G. Geomechanics of faults. — Moscow : GEOS, 2016. — P. 432.
- Kocharyan G. G., Besedina A. N., Gridin G. A., *et al.* Friction as a Factor Determining the Radiation Efficiency of Fault Slips and the Possibility of Their Initiation: State of the Art // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2023. — No. 59. — P. 337–363. — DOI: [10.1134/S1069351323030060](https://doi.org/10.1134/S1069351323030060).
- Kocharyan G. G., Budkov A. M. and Kishkina S. B. Initiation of Tectonic Earthquakes during Underground Mining // *Journal of Mining Science*. — 2018a. — Vol. 54, no. 4. — P. 561–568. — DOI: [10.1134/S1062739118044014](https://doi.org/10.1134/S1062739118044014).

- Kocharyan G. G., Kulikov V. I. and Pavlov D. V. On the influence of mass explosions on the stability of tectonic faults // Physical and technical problems of mineral development. — 2019. — No. 6. — DOI: [10.15372/FTPRI20190605](https://doi.org/10.15372/FTPRI20190605).
- Kocharyan G. G., Ostapchuk A. A., Pavlov D. V., *et al.* The Effects of Weak Dynamic Pulses on the Slip Dynamics of a Laboratory Fault // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2018b. — Vol. 108, 5B. — P. 2983–2992. — DOI: [10.1785/0120170363](https://doi.org/10.1785/0120170363).
- Kocharyan G. G., Qi Ch., Kishkina S., *et al.* Potential triggers for large earthquakes in open-pit mines: A case study from Kuzbass, Siberia // Deep Underground Science and Engineering. — 2022. — Vol. 1, no. 2. — P. 101–115. — DOI: [10.1002/dug2.12028](https://doi.org/10.1002/dug2.12028).
- Kwiatek G., Plenkers K. and Dresen G. Source Parameters of Pico-seismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2011. — Vol. 101, no. 6. — P. 2592–2608. — DOI: [10.1785/0120110094](https://doi.org/10.1785/0120110094).
- Lavrov A. V. and Shkuratnik V. L. Deformation- and fracture-induced acoustic emission in rocks (review) // Akusticheskiy Zhurnal. — 2005. — Vol. 51. — P. 6–18. — EDN: HSIMXL.
- Li B., Li N., Wang E., *et al.* Discriminant Model of Coal Mining Microseismic and Blasting Signals Based on Waveform Characteristics // Shock and Vibration. — 2017. — Vol. 2017. — P. 1–13. — DOI: [10.1155/2017/6059239](https://doi.org/10.1155/2017/6059239).
- Lobatskaya P. M. Zones of dynamic influence of faults based on the analysis of associated ruptures // Geology and Geophysics. — 1983. — No. 6. — P. 53–61.
- Locchi M. E., Scognamiglio L., Tinti E., *et al.* A large fault partially reactivated during two contiguous seismic sequences in Central Italy: The role of geometrical and frictional heterogeneities // Tectonophysics. — 2024. — Vol. 877. — P. 230284. — DOI: [10.1016/j.tecto.2024.230284](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230284).
- Lovchikov A. V. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia // Journal of Mining Science. — 2013. — Vol. 49, no. 4. — P. 572–575. — DOI: [10.1134/S1062739149040072](https://doi.org/10.1134/S1062739149040072).
- Lu C.-P., Liu Y., Zhang N., *et al.* In-situ and experimental investigations of rockburst precursor and prevention induced by fault slip // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2018. — Vol. 108. — P. 86–95. — DOI: [10.1016/j.ijrmms.2018.06.002](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.002).
- Ma J., Zhao G., Dong L., *et al.* A Comparison of Mine Seismic Discriminators Based on Features of Source Parameters to Waveform Characteristics // Shock and Vibration. — 2015. — Vol. 2015. — P. 1–10. — DOI: [10.1155/2015/919143](https://doi.org/10.1155/2015/919143).
- Morozova K. G., Ostapchuk A. A., Besedina A. N., *et al.* Classification of seismic events accompanying the blasting method of mining // Seismicheskie Pribory. — 2022. — Vol. 58, no. 4. — P. 97–110. — DOI: [10.21455/si2022.4.6](https://doi.org/10.21455/si2022.4.6).
- Oparin V. N., Usoltseva O. M., Semenov V. N., *et al.* Evolution of stress-strain state in structured rock specimens under uniaxial loading // Journal of Mining Science. — 2013. — Vol. 49, no. 5. — P. 677–690. — DOI: [10.1134/S1062739149050018](https://doi.org/10.1134/S1062739149050018).
- Ostapchuk A., Morozova K., Markov V., *et al.* Acoustic Emission Reveals Multiple Slip Modes on a Frictional Fault // Frontiers in Earth Science. — 2021. — Vol. 9. — DOI: [10.3389/feart.2021.657487](https://doi.org/10.3389/feart.2021.657487).
- Oye V. Source Parameters and Scaling Relations for Mining-Related Seismicity within the Pyhasalmi Ore Mine, Finland // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2005. — Vol. 95, no. 3. — P. 1011–1026. — DOI: [10.1785/0120040170](https://doi.org/10.1785/0120040170).
- Patonin A. V., Shikhova N. M., Ponomarev A. V., *et al.* Module system of continuous acoustic emission registration for laboratory studies of the rocks destruction processes // Seismicheskie pribory. — 2018. — Vol. 54, no. 3. — P. 35–55. — DOI: [10.21455/si2018.3-3](https://doi.org/10.21455/si2018.3-3).
- Richardson E. Seismicity in Deep Gold Mines of South Africa: Implications for Tectonic Earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2002. — Vol. 92, no. 5. — P. 1766–1782. — DOI: [10.1785/0120000226](https://doi.org/10.1785/0120000226).
- Scholz C. H. Large Earthquake Triggering, Clustering, and the Synchronization of Faults // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2010. — Vol. 100, no. 3. — P. 901–909. — DOI: [10.1785/0120090309](https://doi.org/10.1785/0120090309).
- Shebalin P. N., Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., *et al.* Why Are New Approaches to Seismic Hazard Assessment Required? // Doklady Earth Sciences. — 2022. — Vol. 507, no. 1. — P. 930–935. — DOI: [10.1134/s1028334x22700362](https://doi.org/10.1134/s1028334x22700362).
- Sherman C. I., Bornyakov C. A. and Buddo B. Yu. Regions of dynamic influence of faults. — Novosibirsk : Science, 1983. — P. 112.
- Shkuratnik V. L. and Voznesensky A. S. Acoustic emission of the ultrasonic frequency range as a tool for solving problems of mining geophysics // Mining Journal. — 2009. — No. 1. — P. 54–57. — EDN: LHOUDT.
- Sibson R. H. Thickness of the Seismic Slip Zone // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2003. — Vol. 93, no. 3. — P. 1169–1178. — DOI: [10.1785/0120020061](https://doi.org/10.1785/0120020061).
- Smirnov V. B., Ponomarev A. B. and Zavyalov A. D. Structure of the acoustic regime in rock samples and seismic regime // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 1995. — No. 1. — P. 38–58. — EDN: XGWLWZ.

- Smith S. A. F., Bistacchi A., Mitchell T. M., *et al.* The structure of an exhumed intraplate seismogenic fault in crystalline basement // *Tectonophysics*. — 2013. — Vol. 599. — P. 29–44. — DOI: [10.1016/j.tecto.2013.03.031](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.031).
- Tinti E., Casarotti E., Ulrich T., *et al.* Constraining families of dynamic models using geological, geodetic and strong ground motion data: The Mw 6.5, October 30th, 2016, Norcia earthquake, Italy // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2021. — Vol. 576. — P. 117237. — DOI: [10.1016/j.epsl.2021.117237](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117237).
- Volpe G., Pozzi G. and Collettini C. Y-B-P-R or S-C-C'? Suggestion for the nomenclature of experimental brittle fault fabric in phyllosilicate-granular mixtures // *Journal of Structural Geology*. — 2022. — Vol. 165. — P. 104743. — DOI: [10.1016/j.jsg.2022.104743](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104743).
- Vostrikov V. I., Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., *et al.* Deformation processes features and microseismic emission of rock specimens under loading until failure // *Interexpo Geo-Siberia*. — 2016. — Vol. 2, no. 3. — P. 45–49. — EDN: VXLLEX.
- Walsh F. R. and Zoback M. D. Probabilistic assessment of potential fault slip related to injection-induced earthquakes: Application to north-central Oklahoma, USA // *Geology*. — 2016. — Vol. 44, no. 12. — P. 991–994. — DOI: [10.1130/G38275.1](https://doi.org/10.1130/G38275.1).
- Wiemer S. A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP // *Seismological Research Letters*. — 2001. — Vol. 72, no. 3. — P. 373–382. — DOI: [10.1785/gssrl.72.3.373](https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373).
- Zakharov V. N. Seismoacoustic forecasting and control of the state and properties of rocks in the development of coal deposits. — Moscow : IGD im. A. A. Skochinsky, 2002. — P. 172.
- Zmushko T. Yu., Turuntaev S. B. and Kulikov V. I. Relationship between mine seismicity and the mining regime in the Vorkuta mines // *Dynamic processes in the geospheres*. — 2011. — No. 2. — P. 75–88. — EDN: TMYUCR.