

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 550.34; 622.83

### ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Г. Г. Кочарян, А. М. Будков, С. Б. Кишкина

*Институт динамики геосфер РАН, E-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru,  
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия*

Рассмотрено влияние горных выработок, расположенных вблизи разломов, на возможность возникновения крупных сейсмических событий. Численным моделированием подтверждено, что объем подземных выработок при шахтных работах оказывает влияние на эффективную жесткость массива и на возможность инициирования динамических подвижек, сопровождаемых интенсивным сейсмическим излучением. При возрастании степени нарушенности массива величина эффективного модуля сдвига падает. Расчеты для камер, расположенных только в одном горизонте, показывают снижение эффективного модуля сдвига на 20 %, для камер на двух горизонтах он снижается примерно в 1.5 раза, а для трех горизонтов падает практически вдвое. Показано, что такое снижение эффективной сдвиговой жесткости массива может оказаться критическим с точки зрения возникновения динамической подвижки по разлому.

*Индукцированная сейсмичность, техногенные землетрясения, горные выработки, мониторинг, эффективная жесткость массива, разломные зоны, кулоновское напряжение, моделирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180405

Проведение крупномасштабных горных работ обуславливает разнообразные формы техногенной сейсмичности, среди которых особняком стоят сильные землетрясения с магнитудой  $M \geq 2.8-3.0$  [1]. Для их обозначения используют различные наименования — горно-тектонический удар, техногенное, техногенно-тектоническое, природно-техногенное землетрясения, подразумевая антропогенную причину их возникновения при естественном источнике энергии деформации [2–7]. Очаговые области этих событий представляют собой подвижки по разломам и крупным тектоническим трещинам [8, 9]. В отличие от слабой сейсмичности, приуроченной непосредственно к фронту горных работ, источники сильных событий ( $E_s > 10^9$  Дж) могут располагаться на большом удалении от шахты или карьера. Гипоцентры природно-техногенных событий порой находятся на значительной глубине 5–10 км [1, 4]. При этом они могут происходить со значительной задержкой по отношению к активно проводящимся работам [10].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00095) и РФФИ (проект № 16-05-00694).

В качестве причины техногенного инициирования тектонических землетрясений рассматривается изменение напряженно-деформированного состояния массива в результате ведения горных работ [1–7, 11], хотя упоминаются и такие эффекты, как изменение проницаемости техногенно нарушенных участков и разломных зон; непосредственное влияние сейсмических колебаний от проводимых взрывных работ, накопление малых деформаций и др. [1, 4, 12].

Чаще всего сильные динамические события с излученной энергией выше  $10^{10}$  Дж, связанные с горными работами, происходят при подземной отработке месторождений полезных ископаемых. Эта проблема весьма остро стоит на многих рудниках и шахтах мира.

Проявления горного давления, обусловленные локальными концентрациями напряжений в окрестности горных выработок, такие как шелушение, стрельание, выброс породы в выработку, горные удары, изучены достаточно хорошо [7, 11–14]. В инженерной практике известны методы борьбы с этими явлениями [4, 5]. В большинстве случаев горные удары сопровождаются излучением сейсмических колебаний, но их магнитуда редко превышает  $M \sim 3$ . Считают, что такие события непосредственно связаны с ведением горных работ [15, 16].

Площадные динамические явления, к которым относят техногенные землетрясения и горно-тектонические удары [17], сопровождаются интенсивным сейсмическим эффектом. Известно несколько сейсмических событий с магнитудой более 4.5. Хотя прогноз и предотвращение этих явлений представляют собой проблему, сопоставимую по сложности с прогнозом природных землетрясений, подходы к решению этой задачи постепенно развиваются [18, 19]. Очаговые области техногенных динамических явлений расположены не так глубоко, как у многих природных землетрясений. Поскольку эти события связаны с горными работами, есть надежда проследить причинно-следственные связи в процессе их подготовки и зарождения и попытаться установить параметры, которые могут использоваться для мониторинга.

В настоящей работе проанализировано влияние изменения эффективных упругих характеристик массива вследствие подземной отработки месторождений на возможность инициирования динамических подвижек по разломам, сопровождаемых интенсивным сейсмическим излучением.

#### УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ СДВИГОВОГО ТИПА

Обязательным условием возникновения скольжения по разлому является достижение в локальной области уровня напряжений  $\tau$ , касательных к плоскости разлома, превышающих текущую величину прочности контакта  $\tau_p$ :

$$\tau \geq \tau_p. \quad (1)$$

Заметим, что характерные значения этой прочности до сих пор обсуждаются. Низкие по некоторым данным значения тектонических напряжений в окрестности очагов землетрясений иногда называют парадоксом напряжений [20]. Подчеркнем, что текущее значение прочности может оказаться заметно ниже предельной кулоновской прочности. Примером может служить инициирование скольжения низкоамплитудной вибрацией [21].

Другое необходимое условие — разупрочнение области скольжения с ростом скорости  $v$  и/или амплитуды  $D$  перемещения бортов:

$$\frac{\partial \tau}{\partial v} < 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial D} < 0. \quad (2)$$

Если прочность контакта не будет снижаться в процессе сдвига, то режим динамического скольжения реализоваться не сможет.

Наконец, третье условие: скорость снижения во вмещающем массиве напряжений, касательных к плоскости скольжения (жесткость массива  $K$ ), должна быть ниже, чем скорость снижения сопротивления сдвигу (максимум модуля жесткости разлома  $k_s$  на участке спадающей ветви реологической кривой):

$$|k_s| = \left| \frac{\partial \tau}{\partial D} \right| \geq K = \eta \frac{G}{\hat{L}}, \quad (3)$$

где  $G$  — модуль сдвига вмещающего массива;  $\eta \sim 1$  — коэффициент формы [21];  $\hat{L}$  — характерный размер, связанный с магнитудой землетрясения.

Смысл соотношений (1)–(3) покажем на схеме, приведенной на рис. 1. После достижения уровнем напряжений текущей прочности контакта (на рис. 1  $\tau_p$  соответствует максимуму реологической кривой  $\tau(D)$ , хотя это не обязательно) прочность участка разлома начинает снижаться с ростом относительного перемещения и его скорости. Если условие (3) выполняется (сплошная линия на рис. 1), то возникает динамическая неустойчивость и энергия излучается из системы. Величина излученной энергии в этом примере соответствует площади, заключенной между реологической кривой 1 и линией разгрузки 2 вмещающего массива. В случае, когда условие (3) не выполняется (рис. 1, штриховая линия), динамическое скольжение и, соответственно, излучение энергии невозможны.

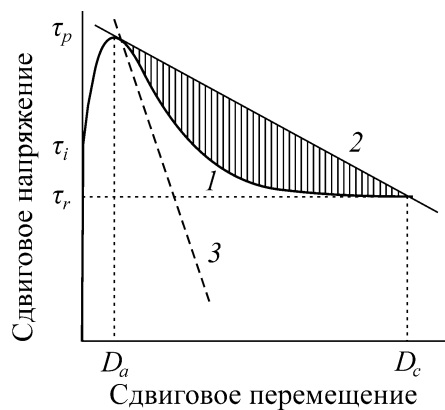


Рис. 1. Схема возникновения скольжения по разлому: 1 — реологическая зависимость “напряжение – перемещение” для разлома; 2, 3 — линии разгрузки вмещающего массива в процессе относительного перемещения берегов; сплошная линия — скорость разгрузки массива ниже, чем скорость снижения сопротивления сдвигу по разлому

Как видно из соотношения (3), стабильный в течение длительного времени разлом может потерять устойчивость в том случае, если жесткость вмещающего массива снизится. Этот эффект можно продемонстрировать на результатах лабораторных экспериментов, в которых изучалось прерывистое скольжение блока горной породы по тонкому слою зернистого материала. Блок, прижатый к основанию силой нормального давления  $F_n$ , двигался под действием приложенного через пружину жесткостью  $k_m$  возрастающего с постоянной скоростью сдвигового усилия. Описание установки и методики проведения экспериментов приведено в [22].

Зависимость максимальной скорости блока в процессе скольжения от жесткости пружины представлена на рис. 2. На врезке показана упрощенная схема проведения эксперимента. В окрестности критического значения жесткости нагружения ( $k_m \sim 2000$  Н/мм для слоя квар-

цевого песка и  $k_m \sim 100$  Н/мм для смеси песка с глиной) происходят эпизоды медленного скольжения, низкочастотные и очень низкочастотные события, при которых излученная энергия весьма мала. Однако уже при снижении жесткости пружины (аналог жесткости массива в натуральных условиях) в 2–3 раза скорость скольжения быстро возрастает, достигая величины, характерной для нормальных лабораторных землетрясений.

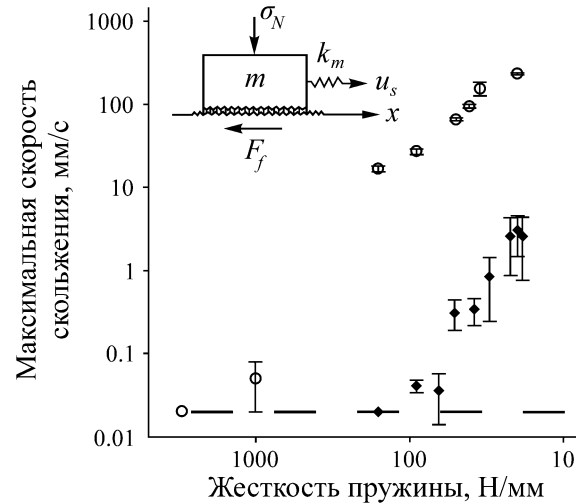


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости скольжения блока в процессе динамической подвижки от жесткости пружины. На врезке — упрощенная схема эксперимента. Светлые значки — заполнитель кварцевый песок; темные значки — смесь кварцевого песка с глиной (5 % по массе). Каждый значок — среднее значение по многим подвижкам. Вертикальные отрезки — среднеквадратичное отклонение. Штриховая линия — скорость протяжки

## ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ УДАРЫ И ТЕХНОГЕННО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

При рассмотрении проблемы инициирования динамических событий принято сопоставлять величину изменения естественного поля напряжений в результате проходки выработок с прочностью породы [11, 23, 24]. Такой подход справедлив для оценки опасности возникновения локальных разрушений. Из сейсмологических данных известно, что в напряженном массиве для инициирования динамической подвижки по разлому достаточно изменения напряжений касательных к плоскости разлома на величину  $\Delta\sigma_c \sim 0.1-0.3$  МПа [25].

Анализ параметров сейсмических колебаний, регистрируемых при крупных землетрясениях, вызванных горными работами на рудниках и шахтах, позволяет заключить, что часть событий описывается классической моделью очага в виде двойной пары сил, тогда как для некоторых событий более подходящими являются другие модели, связанные с отрывным разрушением и обрушением кровли выработок, а также с разрушением целиков. У восстановленного тензора сейсмического момента событий второго типа оказывается существенной изотропная составляющая. Для них характерны высокие значения магнитуды  $M_s$  по сравнению с  $m_b$  и аномальные знаки вступлений [26]. Такие землетрясения чаще встречаются в регионах, считающихся асейсмичными, тогда как события сдвигового типа типичны для регионов, проявляющих природную сейсмичность.

В [27] предлагается различать горно-тектонические удары и техногенные землетрясения, полагая, что очаги первых расположены непосредственно в горных выработках, а вторых — в массиве за пределами выработок. При таком подходе очаг событий, идентифицированных

как горно-тектонические удары, ассоциируется лишь с зоной интенсивных повреждений, зарегистрированных в горных выработках. По результатам обследований ряда объектов после крупных динамических событий в [28] предложено соотношение, связывающее характерный размер очага горно-тектонического удара  $L$  с величиной излученной сейсмической энергии  $E_s$  :

$$\lg E_s = 3.26L + 8.3. \tag{4}$$

Данная зависимость находится в противоречии с представлениями о соотношении между характерным размером очага и излучаемой при землетрясении энергией, существующими в сейсмологии, и прежде всего с законом подобия, согласно которому  $L \sim E^{1/3}$  [29].

Соотношение (4) приведено на рис. 3. Жирной сплошной линией обозначен диапазон данных, для которого построена эта эмпирическая зависимость. Здесь же показано полученное в [21] соотношение для землетрясений:

$$L \approx 0.3E_s^{1/3}. \tag{5}$$

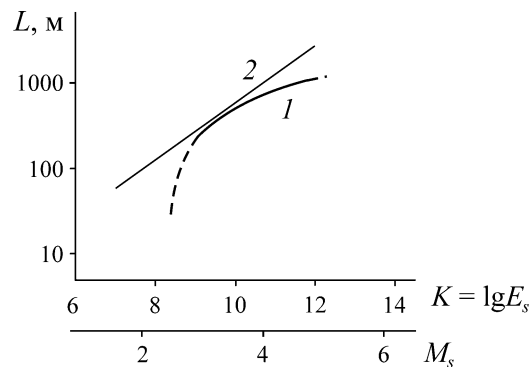


Рис. 3. Соотношение между характерным размером очага и энергетическим классом события: 1 — зависимость (4); 2 — зависимость (5). Жирная линия — диапазон данных эмпирической зависимости (4), штриховая — экстраполяция (1)

Видно, что соотношения (4) и (5) сопоставимы лишь в узком диапазоне магнитуд сейсмических событий  $M_s \sim 3.0-3.5$ . Попытка экстраполяции в диапазон более слабых или более сильных землетрясений демонстрирует резкое расхождение с данными сейсмологических наблюдений. Это может свидетельствовать о том, что во многих случаях разрушения горных выработок являются не столько источником сейсмических волн, сколько следствием землетрясения. Массовое разрушение горных выработок и целиков на значительной площади может быть связано непосредственно с подвижкой по разлому или быть следствием динамического воздействия сейсмических волн. Как известно, амплитуда массовой скорости колебаний грунта вблизи очага составляет величину от десятков сантиметров до нескольких метров в секунду [21]. Такие скорости колебаний грунта приводят к тяжелым повреждениям подземных выработок [30].

Магнитуда сильнейших природно-техногенных землетрясений, связанных с подземными работами на территории России, достигает 4.7–5.1. В соответствии с (5) размеры источника таких событий составляют 2300–3800 м, что значительно превышает глубину расположения выработок и сопоставимо с горизонтальными размерами всего шахтного поля крупного рудника. Разделение событий больших магнитуд ( $M > 3.5$ ) на горно-тектонические удары и тектони-

ческие землетрясения представляется довольно искусственным. Наиболее вероятно, что крупные события в напряженных массивах связаны именно с подвижкой по существующему в массиве активному разлому. Под активным разломом следует понимать тектоническое нарушение с признаками постоянных или периодических перемещений бортов разлома в течение первых десятков тысяч лет, считая от современности [31]. Так, при землетрясении  $M=4.3-4.8$  16.04.1989 г. в Хибинах подвижка произошла по разлому С-З простирания со средним углом падения  $35^\circ$ , представленному жилой эгирина, мощностью 15–25 см, а при землетрясении 2004 г. с  $M \sim 2.2$  на глубоком руднике Южной Африки смещение отмечалось почти исключительно вдоль четырех существовавших ранее сегментов древней разломной зоны [9].

### ВЛИЯНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗЛОМА

Разветвленная сеть выработок в окрестности тектонического разлома может оказать заметное влияние на эффективную жесткость массива, а следовательно, и на возможность возникновения динамических подвижек. С целью оценки этого эффекта проведено численное моделирование процесса сдвигового деформирования скального блока с выработками. Расчеты проводились при помощи двумерного программного комплекса, разработанного на основе лагранжева численного метода “Тензор” [33]. Задача решалась в плоской постановке. Рассмотрен упругий блок (плотность  $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$ , модуль объемного сжатия  $K = 28 \text{ ГПа}$ , модуль сдвига  $G = 11.435 \text{ ГПа}$ , скорость продольных волн  $a_0 = 4000 \text{ м/с}$ ) с размерами  $H = 600 \text{ м}$ ,  $L = 780 \text{ м}$ .

Характерные размеры задачи, согласно зависимости (5), соответствуют объему, в котором запасается упругая энергия землетрясения с магнитудой 3.0–3.5. Схема постановки расчета приведена на рис. 4. Правая часть блока жестко закреплена, а на левой грани задается линейно нарастающее со временем сдвиговое напряжение. Скорость нарастания сдвигового напряжения выбиралась так, чтобы обеспечить режим деформирования блока, близкий к квазистатическому. Это значение определялось на основе предварительной серии расчетов.

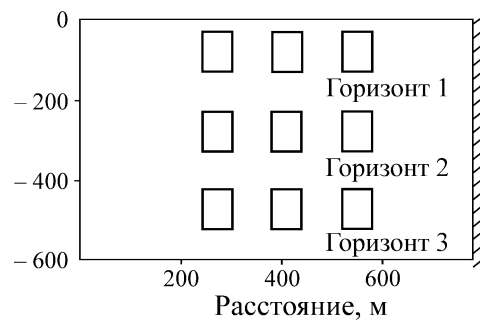


Рис. 4. Схема расчета

Вначале проводились расчеты для монолитного блока. На рис. 5 значками показана зависимость “приложенное сдвиговое напряжение – сдвиговая деформация”. Относительная деформация рассчитывалась как отношение перемещения верхнего левого угла блока к ширине блока  $\varepsilon = W_r / H$ . Наилучшее приближение результатов расчетов линейной функцией дает значение эффективного модуля сдвига:

$$G_{eff} = \frac{\tau_s}{\varepsilon}. \quad (6)$$

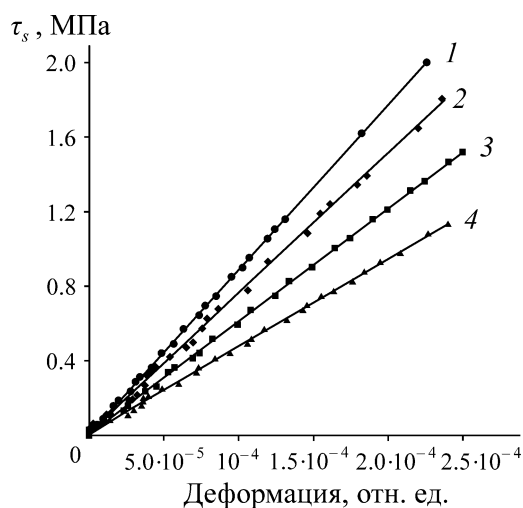


Рис. 5. Зависимость “сдвиговое напряжение – сдвиговая деформация” для монолитного блока (1) и для блоков с 1, 2 и 3 рядами выработок (соответственно линии 2, 3, 4). Значки — результаты расчета, прямые — наилучшее приближение линейной функцией

Оценка по (6) с использованием результатов численного расчета для монолитного блока (рис. 3) дает величину  $G_{eff} = 8.84$  ГПа (линейная регрессия с коэффициентом корреляции  $R = 0.996$ ), т. е. на  $\sim 20\%$  меньше модуля сдвига материала. Это является следствием того, что предположение о равномерном распределении сдвиговых напряжений для блока конечных размеров не выполняется. Можно говорить только о некотором эффективном сдвиговом модуле массива  $G_{eff}$  — коэффициенте пропорциональности между напряжениями и деформациями.

Для оценки влияния пройденных выработок на величину эффективного модуля массива, а следовательно, и на жесткость массива, используемую в критерии возникновения неустойчивости, выполнены расчеты с незаполненными и заполненными отверстиями в упругом блоке. Длина и высота одного отверстия составляли соответственно 100 и 60 м, что равнялось размерам рабочих камер шахты АО “КМАруда” [34]. Расстояние между выработками принималось 100 м. В основной серии выполнялись расчеты с одним (вариант соответствует актуальной ситуации на шахте “КМАруда”), двумя (проектируемый вариант на шахте “КМАруда”) и тремя (гипотетический вариант) горизонтами выработок. Расстояние между горизонтами 80 м. Схема расположения выработок приведена на рис. 4, а результаты расчета зависимостей  $\tau_s(\varepsilon)$  — на рис. 5.

Как и следовало ожидать, величина эффективного модуля сдвига тем меньше, чем больше степень нарушенности массива. Для одного горизонта выработок значение  $G_{eff}$  снижается примерно на 20%, для двух — в 1.5 раза. Для трех горизонтов эффективный модуль массива падает почти вдвое. Такое снижение может оказаться критическим с точки зрения инициирования динамической подвижки по разлому.

Несмотря на то что геометрия массива с горными выработками далека от модели пористой среды, результаты численного расчета в определенном диапазоне параметров с неплохой точностью совпадают с результатом оценки эффективного модуля среды по соотношениям так называемой модели критической пористости А. Нура [35], согласно которой модуль сдвига сухой пористой среды  $G_{eff}$  определяется следующим образом:

$$\frac{G_{eff}}{G_s} = \left( 1 - \frac{\phi}{\phi_{кр}} \right)^b, \quad \phi < \phi_{кр}, \quad (7)$$

где  $G_s$  — модуль сдвига сплошного массива;  $\phi$  — эффективная пористость среды;  $\phi_{кр}$  — критическое значение пористости — относительный объем пустот, при котором материал теряет связанность;  $b$  — параметр, определяемый эмпирически.

Зависимость (7) при  $b=1$  и  $\phi_{кр} = 0.244$  представлена на рис. 6 штриховой линией. Там же значками показаны результаты численных расчетов. Значения эффективного модуля сдвига в каждом варианте расчета нормированы на значение для сплошного массива. Кроме того, приведены результаты расчета дополнительных вариантов с 4, 5 и 6 рядами выработок. Отмечено, что при больших относительных величинах площади выработок зависимость отклоняется от соотношения (7).

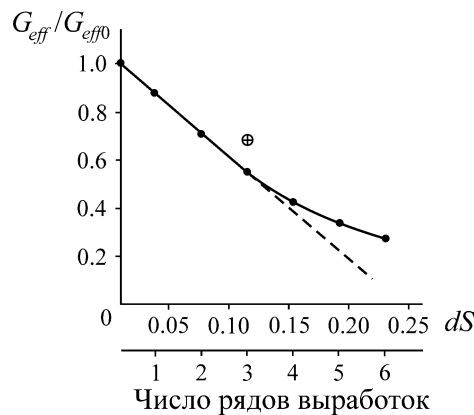


Рис. 6. Зависимость относительного эффективного модуля сдвига участка массива с выработками от доли площади, занятой незаполненными отверстиями

В случае закладки камер разрушенной породой с модулем упругости  $E = 5$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0.32$  (кружок на рис. 6) снижение модуля заметно меньше и даже при трех горизонтах составляет только 34 %, что существенно снижает вероятность возникновения неустойчивости по сравнению с массивом, содержащим незаполненные выработки.

Помимо рассмотренного влияния сети горных выработок на эффективную жесткость массива, может наблюдаться иницирующий эффект изменения кулоновских напряжений на плоскости разлома, который будет рассмотрен в следующей работе.

## ВЫВОДЫ

Крупные сейсмические события с излученной энергией выше  $10^{10}$  Дж, инициированные горными работами, связаны с динамической подвижкой по существующему в массиве активному разлому. При этом условия возникновения скольжения включают в себя как достижение соответствующего уровня напряжений, так и определенные соотношения между механическими свойствами разлома и вмещающего массива горных пород.

Разветвленная сеть выработок в окрестности тектонического разлома оказывает заметное влияние на эффективную жесткость массива и на возможность возникновения динамических подвижек. Согласно результатам лабораторных экспериментов, примерно двукратное снижение эффективной жесткости массива приводит к возникновению динамической неустойчивости активного разлома.



Простейшая оценка эффективной сдвиговой жесткости массива, содержащего выработки, может быть выполнена с использованием соотношений модели критической пористости. Закладка камер разрушенной породой существенно снижает вероятность возникновения динамической неустойчивости.

Поскольку подземная отработка месторождений меняет эффективные упругие свойства породного массива в непосредственной окрестности активного разлома, вполне вероятно, что при отсутствии антропогенного вмешательства накопленная энергия деформирования реализовалась бы не через динамическую подвижку (землетрясение), а иным способом, например путем медленного крипа или так называемых событий медленного скольжения без излучения интенсивных сейсмических колебаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. — 2016. — № 2. — С. 22–44.
2. Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 68–73.
3. Назаров Л. А., Назарова Л. А., Ярославцев А. Ф., Мирошниченко Н. А., Васильева Е. В. Эволюция полей напряжений и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2011. — № 6. — С. 6–13.
4. Адушкин В. В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59. — № 5. — С. 709–724.
5. Сейсмичность при горных работах / под ред. Н. Н. Мельникова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002. — 325 с.
6. Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2011. — 184 с.
7. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И. К вопросу классификации горных ударов // ФТПРПИ. — 1986. — № 5. — С. 3–11.
8. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
9. Heesakkers V., Murphy S., Lockner D. A., and Reches Z. Earthquake rupture at focal depth, Part II: Mechanics of the 2004 M 2.2 Earthquake Along the Pretorius Fault, TauTona mine, South Africa, 2011, Vol. 168. — P. 2427–2449.
10. Snelling P., Godin L., and McKinnon S. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada, Int. J. of Rock Mech. & Mining Sciences, 2013, Vol. 58. — P. 166–179.
11. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.
12. Курленя М. В., Еременко А. А., Башков В. И. Влияние взрывных работ на сейсмические и динамические явления при подземной разработке рудных удароопасных месторождений Сибири // Горн. журн. — 2015. — № 8. — С. 69–71.
13. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / под ред. И. М. Петухова, А. М. Ильина, К. Н. Трубецкого. — М.: АГН, 1997. — 376 с.
14. Еременко А. А., Серяков В. М., Гахова Л. Н. Геомеханическое обоснование параметров и способа создания демферного слоя в окрестности выработки для снижения уровня горного давления // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 61–70.
15. Gibowicz S. J. and Kijko A. An introduction to mining seismology, San Diego, Academic Press Inc., 1994. — 400 p.

16. **Knoll P. and Kuht W.** Seismological and technical investigations of the mechanics of rock bursts, Proc. of the 2<sup>nd</sup> Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, Minneapolis, 1988, ed. C. Fairhurst, Balkema, Rotterdam, 1990. — P. 129–138.
17. **Маловичко А. А., Завьялов А. Д., Козырев А. А.** Горные удары / Монография в 6 т.: под общей редакцией В. И. Осипова, С. К. Шойгу. Т. 2 Сейсмические опасности. — М.: Крук, 2000. — С. 243–293
18. **Томилини Н. Г., Воинов К. А.** Контроль состояния породного массива на основе анализа вариации временных интервалов между сейсмическими событиями // Методические основы контроля состояния природного массива и прогноза динамических явлений. — М., 1994. — С. 7–24.
19. **Дягилев Р. А.** Сейсмологический прогноз на рудниках и шахтах Западного Урала: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2002. — 180 с.
20. **Родкин М. В., Рундквист Д. В.** Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. — Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2017. — 288 с.
21. **Кочарян Г. Г.** Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
22. **Кочарян Г. Г., Остапчук А. А., Мартынов В. С.** Изменение режима деформирования разлома в результате инъекции флюида // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 20–28.
23. **Ловчиков А. В., Савченко С. Н.** Оценка и последствия изменений напряженного состояния массива при затоплении рудника “Умбозеро” // ГИАБ. — 2014. — № 11. — С. 213–222.
24. **Ловчиков А. В., Савченко С. Н.** Напряженное состояние горных пород вблизи очистных выработок на руднике “Карнасурт” // Вестн. Мурманского ГТУ. — 2013. — Т. 16. — № 4. — С. 741–747.
25. **King G. C. P., Stein R. S., and Lin Jian** Static stress changes and the triggering of earthquakes, Bulletin Seismological Society of America, 1994, 84 (3). — P. 935–953.
26. **McGarr A.** Moment tensors of ten Witwatersrand mine tremors, Pure and Applied Geophysics, 1992, Vol. 139. — P. 781–800.
27. **Ловчиков А. В.** Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 68–73.
28. **Ловчиков А. В.** Оценка геодинамической опасности месторождений по энергии сейсмических проявлений в рудниках // Горн. журн. — 2004. — № 10. — С. 43–47.
29. **Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф.** Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
30. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. — 423 с.
31. **Кожурин А. И., Пономарева В. В., Пинегина Т. К.** Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2008. — Вып. 12. — № 2. — С. 10–27.
32. **Сырников Н. М., Тряпицын В. М.** О механизме техногенного землетрясения в Хибинах // ДАН СССР. — 1990. — Т. 314. — № 4. — С. 830–833.
33. **Архипов В. Н., Борисов В. А., Будков А. М.** Механическое действие ядерного взрыва. — М.: Физматлит, 2003. — 550 с.
34. **Кочарян Г. Г., Золотухин С. Р., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Спунгин В. Г.** Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 16–24.
35. **Nur A., Mavko G., Dvorkin J., and Galmudi D.** Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks, The Leading Edge, 1998, 17 (3). — P. 357–362.

Поступила в редакцию 22/VI 2018