

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 550.34; 622.83

ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ОТКРЫТЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ

Г. Г. Кочарян, 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 открытых горных работ на возможность возникновения крупных сейсмических событий. Описаны условия инициирования динамических событий сдвигового типа. На примере выработки с параметрами близкими к размерам Бачатского карьера в Кузбассе, проведена количественная оценка изменения в результате выемки породы напряженного состояния на плоскости будущего разрыва техногенно-тектонического землетрясения, приуроченного к плоскости разлома. Расчеты проведены для разных геометрических параметров разломной зоны: более заметные изменения наблюдаются на пологопадающих надвигах, менее заметные — на крутопадающих сбросах и сдвигах. Для крупных карьеров зона, в которой положительные изменения кулоновских напряжений на плоскости разлома превышают несколько десятых мегапаскалей, имеет значительный размер и ее площадь заметно больше площади зоны нуклеации землетрясений с магнитудой $M \leq 6$. В таком случае даже небольшой вариации, составляющей единицы процентов от уровня естественных напряжений, может оказаться достаточно для инициирования сейсмогенерирующих подвижек по напряженным разломам. Установлено, что в отличие от случая подземной отработки месторождений открытые горные работы не влияют на локализацию очагов крупных землетрясений, но способны приблизить момент события.

Индукцированная сейсмичность, техногенные землетрясения, открытые горные работы, карьер, мониторинг, зона нуклеации землетрясения, разломная зона, кулоновское напряжение

DOI: 10.15372/FTPRPI20180505

Техногенные землетрясения связывают обычно с подземными горными работами, проводящимися на больших глубинах в массивах со значительной тектонической составляющей поля напряжений, таких как Хибинский или Ловозерский массивы на Кольском полуострове, Североуральский бокситовый рудник на Урале или Таштагольское месторождение в Хакасии и др. [1–5]. Относительно новыми явлениями являются резкое увеличение сейсмичности в ближайшей окрестности угольных разрезов Кузбасса и беспрецедентный рост магнитуды отдельных сейсмических событий [6–9].

Условия инициирования динамических событий сдвигового типа рассмотрены в [10]. Показано, что наряду с достижением на участке разлома, называемом областью нуклеации землетрясения, текущей величины прочности контакта, неизменными являются условия разупрочнения области скольжения с ростом скорости и/или амплитуды перемещения бортов, а также определенное соотношение между жесткостью разлома и сдвиговой жесткостью массива [10]. Эпицентры крупных сейсмических событий, происходящих в окрестности карьеров, лежат на глубине нескольких километров. Это означает, что выемка и перемещение породы не способны оказать влияние ни на свойства разлома, ни на свойства вмещающего массива в окрестности очага землетрясения. В этой связи в качестве основного фактора следует рассмотреть изменение параметров поля напряжений.

В настоящей работе выполнена количественная оценка возможности инициирования крупного землетрясения работами по выемке и перемещению породы при разработке глубоких карьеров.

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ КАРЬЕРА

После землетрясения 18 июня 2013 г. с магнитудой $M_L = 6.1$ ($m_b = 5.8$), эпицентр которого располагался в пределах Бачатского угольного разреза одного из крупнейших угледобывающих предприятий Кемеровской области, вышел ряд публикаций, посвященных сейсмичности Кузбасса [3, 6–9; и др.]. Бачатское землетрясение оказалось крупнейшим среди всех, приуроченных к добыче твердых полезных ископаемых. В эпицентральной зоне интенсивность колебаний составила $I_0 = 7$ баллов и множество зданий было разрушено. В 5-балльную зону попали города Белово и Гурьевск, в 4-балльную — Прокопьевск, Киселевск, Новокузнецк [6–9]. Бачатский карьер в 2013 г. имел следующие размеры: длина — 10 км, ширина — 2.2 км, глубина — 320 м [7].

Эпицентр землетрясения (координаты 54.29° с. ш., 86.17° в. д.) находился на территории Бачатского разреза [7, 8], глубина очага составляла от 2 км (данные International Date Centre, Великобритания) до 14 км (ГС РАН, Обнинск) [3, 6]. По данным работ [7, 8], в которых детально исследовались параметры последовательности афтершоков Бачатского землетрясения, глубина очага основного толчка составила 4 км. Рассчитанный механизм очага главного толчка близок к чистому взбросу; нодальные плоскости, одна из которых является плоскостью разрыва, расположены вдоль простирания разреза [7, 8]. Также вдоль простирания разреза вытянута область расположения эпицентров афтершоков. Ее протяженность равна примерно 10 км [7, 8].

На основании данных об эволюции сейсмичности Кузбасса, а также упомянутых сведений о расположении афтершоков, некоторые авторы считают несомненной техногенную природу Бачатского события [3, 6–9, 11; и др.]. В качестве механизмов инициирования приводятся общие соображения об изменении поля напряжений в результате выемки и перемещения горной массы. Так, в [11] отмечается, что "...в результате формирования карьерной выемки глубиной более 350 м и длиной до 10 км по простиранию произошло снижение нормального сжатия полого наклонных сместителей взбросов, что при сохранении горизонтального сжатия могло привести к толчкообразному смещению их висячих крыльев вверх, что и вызвало землетрясение и последующие афтершоки". В [3]: "Основным механизмом образования таких триггерных землетрясений с очагами тектонической природы является изменение существующих в массиве естественных геодинамических и гидродинамических режимов под воздействием комплекса техногенных нагрузок. В результате в массиве происходят изменения напряженно-деформационного состояния, которые сопровождаются концентрацией тектонических напряжений на различного вида неоднородностях и разломах вплоть до критического состояния".

В то же время в нескольких публикациях приводятся данные численного расчета поля напряжений в окрестности карьера, где делаются следующие заключения:

1. “Влияние карьерной выемки на равномерность распределения естественных напряжений в массиве распространяется на расстояние $1 - 1.5$ характерных размеров карьера, т. е. в глубину на $(1 - 1.5)h$, где h — глубина карьера, а в стороны — на $(1 - 1.5)L$, где L — горизонтальный размер карьера в его верхней части” [12].

2. “Горные работы по выемке угля из Бачатского карьера не могли быть причиной Бачатского землетрясения 18.06.2013 г. ввиду незначительного изменения напряженно-деформированного состояния вблизи его окрестности, вследствие чего это землетрясение нельзя считать техногенным” [13].

3. “Выемка угля и породной массы Бачатским карьером ни в коей мере не могла спровоцировать техногенное землетрясение, тем более такой мощности ($M_L = 6.1$)” [14].

Действительно, техногенные землетрясения в карьерах относятся к категории довольно редких проявлений техногенной сейсмичности. В этой связи необходимо разобраться, в какой мере горные работы могут стать причиной крупного сейсмического события. Для этих целей оценим изменение напряженно-деформированного состояния массива в результате выемки породы в карьере с параметрами близкими к карьеру Бачатского угольного разреза. Для приближенных оценок используем решение задачи Лява [15], в которой рассматривается поле напряжений при приложении нагрузки к участку прямоугольной формы на поверхности упругого полупространства. Если глубина котлована h невелика по сравнению с линейными размерами в плане (рис. 1а), то выемку породы можно с некоторым приближением отождествлять со снятием нагрузки $\zeta_z = \rho gh$, равномерно распределенной по площади выемки [16] (рис. 1б). Тогда для определения напряжений в массиве ниже уровня дна карьера можно применить расчетную схему, показанную на рис. 1. При достаточных в плане размерах выемки искажения значений напряжений, вносимые из-за неравноценности расчетной схемы и действительной ситуации, не будут значительными [17].

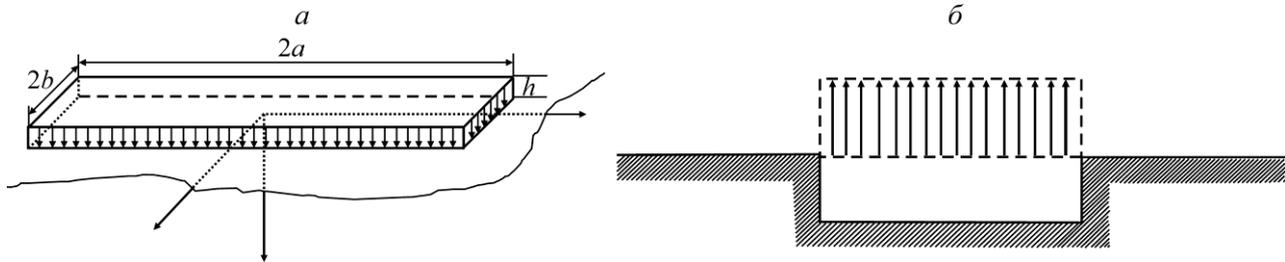


Рис. 1. Расчетная схема для задачи Лява: а — модель карьера, глубина выемки существенно меньше ее линейных размеров; б — напряженно-деформируемое состояние массива моделируется снятием нагрузки, равномерно распределенной по площади выемки

Решение задачи, представленное в [15], содержит аналитические выражения только для вертикальной компоненты напряжения σ_z . Для всех составляющих тензора соответствующие выражения даны в [18]. Для справки приведем выражение для вертикального напряжения σ_z для точек, расположенных на вертикали, проходящей через центр участка с координатами $(x=0, y=0)$:

$$\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{ab}{z\sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} + \frac{abz(a^2 + b^2 + 2z^2)}{(a^2 + z^2)(b^2 + z^2)\sqrt{a^2 + b^2 + z^2}} \right]. \quad (1)$$

На рис. 2 показано изменение величины $\Delta\sigma_z$ от глубины для выемки с параметрами близкими к соответствующим значениям для Бачатского разреза. Плотность породы принята $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Можно видеть, что на глубине в несколько километров изменение вертикальной компоненты поля напряжений в результате выемки породы составляет менее одного процента от литостатического напряжения. Аналогичные результаты, полученные в численных расчетах [12, 13], привели к заключению о незначительном влиянии выемки породы на напряженное состояние породного массива на вероятной глубине расположения очагов сейсмических событий.

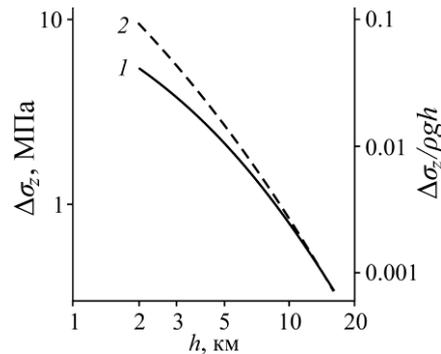


Рис. 2. Изменение вертикальной компоненты напряжений под центром карьера: 1 — абсолютная величина; 2 — нормированная на соответствующее значение литостатических напряжений. Глубина выемки 300 м, размеры в плане $2 \times 10 \text{ км}$

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ТРИГГЕРНУЮ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Насколько изменение напряженного состояния может быть критичным по отношению к инициированию крупных техногенных землетрясений, рассмотрим с использованием подхода, применяемого в сейсмологии при анализе афтершоковых последовательностей крупных землетрясений [19]. Согласно этому подходу, изменение поля напряжений как бы “подталкивает” соседний разлом несколько ближе к порогу кулоновского разрушения. Этот процесс часто описывают при помощи оценки вариации так называемой функции Кулона на ориентированной определенным образом площадке:

$$\sigma_c = \tau - \mu(\sigma_n - p), \tag{2}$$

где σ_n и τ — нормальное и касательное к плоскости разлома напряжения; p — поровое давление; μ — коэффициент трения.

На стадии подготовки динамического срыва $\sigma_c < 0$. В случае увеличения касательного напряжения τ или снижения эффективного нормального напряжения $(\sigma_n - p)$ разлом приближается к критическому состоянию $\sigma_c = 0$. Хотя в натуральных условиях определить значения напряжений на сейсмогенной глубине достаточно сложно, можно оценить изменение напряжений и при помощи этой оценки рассчитать изменение сдвиговых и нормальных напряжений на близлежащих нарушениях сплошности. Таким образом, даже не зная абсолютных значений напряжений, можно вычислить изменение функции Кулона, используя инкрементальное уравнение

$$\Delta\sigma_c = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta p), \tag{3}$$

из которого можно понять, был ли разлом подведен ближе к критическому состоянию (положительное приращение $\Delta\sigma_c > 0$), либо, наоборот, отодвинут в более стабильное состояние ($\Delta\sigma_c < 0$). Заметим, что для этих расчетов не требуется сведений о НДС в регионе и не рассматриваются поля напряжений от других источников.

Кулоновская теория инициирования получила широкое распространение, явившись одним из популярных объяснений того, что афтершоки землетрясения проявляются не только в пределах разломной зоны, но и в соседних областях [19, 20]. Обычно наилучшее соответствие изменения кулоновского напряжения и распределения афтершоков наблюдается на расстояниях, превышающих несколько километров от разлома землетрясения, поскольку ближе существенную роль играют неизвестные детали распределения перемещений и геометрии. Пример подобного расчета для двух землетрясений в Южной Калифорнии приведен на рис. 3.

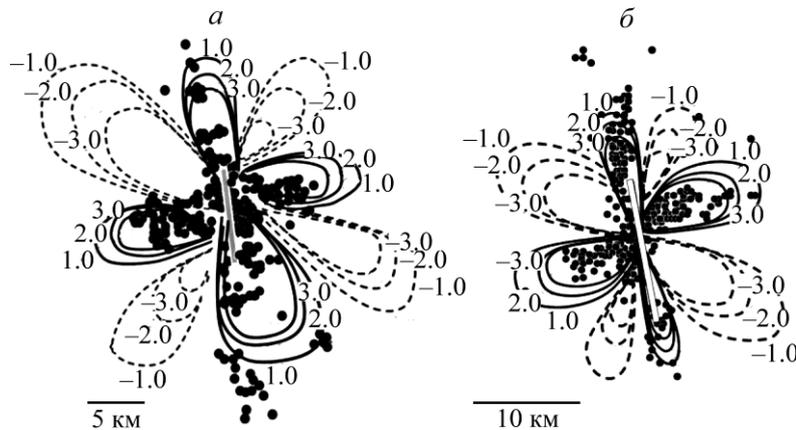


Рис. 3. Результаты расчета изменения кулоновских напряжений (бар) в результате подвижки в очаге при землетрясениях 1979 Homestead Valley $M_S = 5.6$ (а) и 1992 Joshua Tree $M_S = 6.1$ (б) на оптимально ориентированных плоскостях разломов по данным [20]. Точки — афтершоки с магнитудой $M > 1$

Отметим, что изменения напряжений, приводящие к инициированию деформационных процессов, весьма малы. Сопоставление результатов расчетов изменений статического поля напряжений с распространенностью афтершоков показывает, что изменения напряжений $\Delta\sigma_c$ порядка 0.1–0.3 МПа достаточно для инициирования сейсмичности, в то время как снижение на ту же величину сдерживает ее. Однако такая картина наблюдается не всегда [21]. Такие малые величины, будучи незначительной частью общего сброса напряжений при землетрясении, указывают на то, что квазистатические изменения напряжений не являются причиной землетрясения, а только приближают или удаляют момент события.

Для того чтобы оценить изменение вариации функции Кулона $\Delta\sigma_c$ на плоскости будущего разрыва техногенно-тектонического землетрясения в результате выемки породы, необходимо знать геометрические параметры разломной зоны. Сведения о разломной тектонике региона разреза Бачатский довольно ограничены. По данным [11], в окрестности расположены Тырганский, Салаирский, Бачатский взбросы, которые имеют падение на юго-запад под углами 30–50°. Расположение гипоцентров афтершоков землетрясения 18 июня 2013 г., координаты которых были определены установленной в окрестности Бачатского карьера временной сетью Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН [7, 8], не противоречит этим данным. Гипоцентр основного толчка располагался под юго-восточной частью карьера [7, 8]. Глубина очага существенно различается по данным разных сетей. Согласно [8], она составляет $h \sim 4$ км, что в целом подтверждается расположением гипоцентров афтершоков.

Чтобы оценить влияние горных работ на процесс инициирования сейсмичности, рассчитана функция (3) для взбросов двух типов: а) падение под углом 30° в юго-восточном направлении и б) падение под углом 30° в юго-западном направлении. Таким образом, в первом случае направление падения направлено вдоль длинной оси карьера Бачатского разреза (рис. 4а), а во втором — вдоль короткой (рис. 4б). Рассчитывалось несколько вариантов глубины и угла расположения плоскости разлома относительно свободной поверхности.

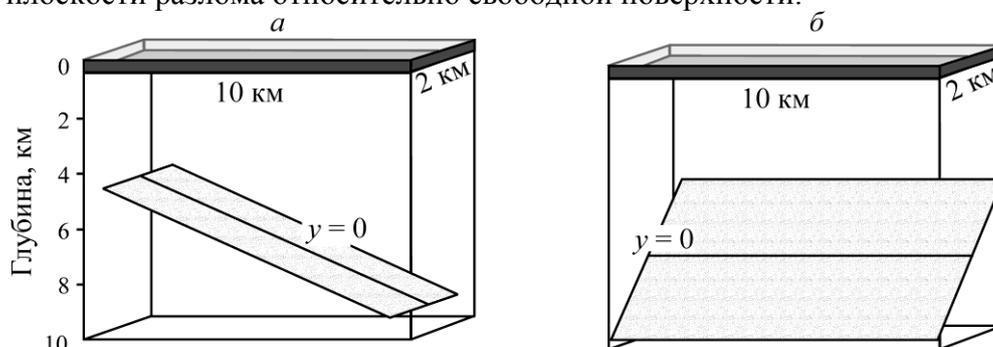


Рис. 4. Схема расчета для случая падения плоскости разлома вдоль (а) и поперек (б) простирания карьера

Расчеты осуществлялись следующим образом. Вначале по соотношениям типа (1) вычислялись приращения всех компонент поля напряжений $\Delta\sigma_{ij}$ в системе координат, приведенной на рис. 1, для полупространства с выемкой размером 10×2 км. Затем по известным соотношениям находились приращения нормального $\Delta\sigma_n$ и касательного $\Delta\tau$ напряжений на соответствующей площадке. Результаты расчетов для центральной оси плоскости разлома ($y = 0$) показаны на рис. 5 в виде эпюр приращения напряжений, касательных к плоскости разлома.

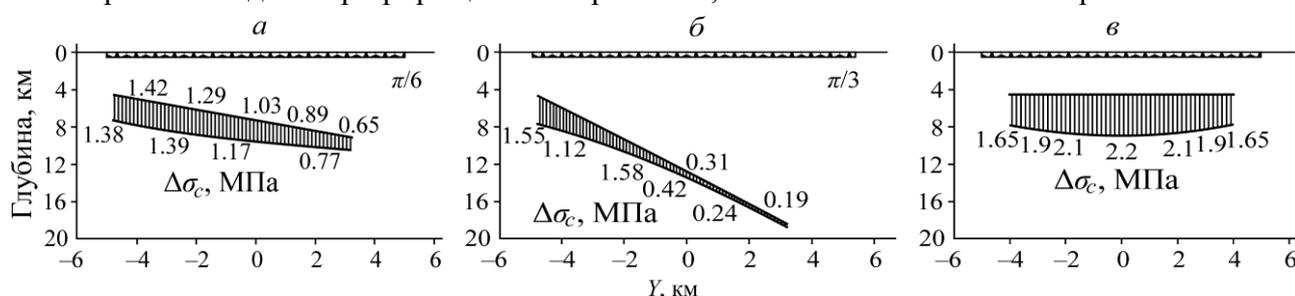


Рис. 5. Результаты расчета приращения кулоновского напряжения: глубина плоскости разлома от 4 км, угол падения 30° (а) и 60° (б), плоскость разлома параллельна свободной поверхности (в)

Видно, что на вероятных глубинах расположения гипоцентра землетрясения величина приращения кулоновского напряжения является положительной, т. е. подводящей разлом ближе к критическому состоянию, и составляет единицы мегапаскалей, что заметно превышает величину $0.1 - 0.3$ МПа, которая, судя по результатам сейсмологических наблюдений, является нижней границей приращения статических кулоновских напряжений на плоскостях оптимально ориентированных разломов в зоне инициирования афтершоков [20].

Как показывают результаты расчета (рис. 5), значимые положительные изменения функции (3) наблюдаются на весьма значительном участке разлома протяженностью, характерной для размеров карьера. В первую очередь это верно для пологопадающих и параллельных свободной поверхности разломов (рис. 5а, в); здесь значения изменения кулоновских

напряжений на глубине около 4 км устойчиво превышают 1 МПа, а для горизонтального разлома превышают 2 МПа. На крутопадающих сбросах и сдвигах (рис. 5б) зона, в которой изменения кулоновских напряжений на плоскости разлома превышают 0.3 МПа, существенно меньше, однако ее площадь значительно превосходит площадь зоны нуклеации землетрясений с магнитудой $M \leq 6$.

В этой связи необходимо подчеркнуть следующее обстоятельство. Сейсмогенные движения по разломам рассматриваются в геомеханике как проявление фрикционной неустойчивости. Этот процесс имеет фазы зарождения, распространения разрыва и его остановки. На стадии зарождения скорость разрыва увеличивается от квазистатического значения, характерного для асейсмического скольжения, до динамического значения C_r . Участок разлома, на котором скорость разрыва возрастает до величины C_r , называют зоной зарождения разрыва или зоной нуклеации. Для того чтобы процесс развивался, необходимо, чтобы размер этой зоны L_c превышал определенную величину. Величина L_c зависит от размера разлома, его фрикционных параметров и упругих свойств окружающего массива горных пород [22]. В целом размер зоны нуклеации обычно соответствует магнитуде сейсмического события. Если для относительно небольшого землетрясения с магнитудой $M \sim 3$ размер зоны зарождения скольжения составляет ~ 30 м, то для землетрясения типа Бачатского, с магнитудой $M \sim 6$, размер зоны нуклеации достигает уже порядка 1000 м.

Существующие представления о старте и остановке сейсмогенных разрывов не дают однозначного ответа о закономерностях этих явлений. В ранних работах предполагалось, что землетрясения начинаются и заканчиваются именно на особых участках разлома, обладающих относительно высокой прочностью. Позже было выдвинуто предположение, что область нуклеации землетрясений располагается как раз на слабых участках разлома, оптимальным образом ориентированных относительно поля напряжений. В настоящее время многие специалисты склоняются к мысли, что зоны нуклеации — это участки, обладающие свойствами скоростного разупрочнения — снижения сопротивления сдвигу с ростом скорости скольжения [22].

В любом случае такой особый участок разлома должен оказаться в области значимых положительных изменений функции (3). Локальное в окрестности горной выработки, пусть даже значительное изменение поля напряжений в зоне с размерами меньше L_c , не приведет к инициированию крупного события. Это означает, что чем больше площадь карьера, тем выше вероятность инициирования крупных сейсмических событий на напряженном разломе.

ВЫВОДЫ

Обработка результатов сейсмологических наблюдений показывает, что сильные сейсмические события с магнитудами $M > 4-6$ имеют характерный размер очага 1–10 км. Для реализации процесса распространения динамического разрыва такой длины необходимо, чтобы вся очаговая область или, по крайней мере, зона сопоставимая с ней по размеру, находилась в состоянии близком к предельному. За достижение соответствующего напряженного состояния в столь обширной области “ответственно” естественное поле напряжений породного массива, а горные работы играют роль спускового крючка.

Расчет показывает, что выемка и перемещение породы в крупном добывающем карьере приводят к результирующему изменению кулоновских напряжений на плоскостях разломов. Величина этих изменений на глубине в несколько километров составляет от десятых долей до единиц мегапаскалей. Наибольшие изменения наблюдаются на пологопадающих надвигах, а наименьшие — на крутопадающих сбросах и сдвигах. Величины, составляющей порядка не-

скольких процентов и менее от уровня естественных напряжений, может оказаться достаточно для инициирования сейсмогенерирующих подвижек по напряженным разломам. Об этом, в частности, свидетельствует распределение гипоцентров афтершоков в окрестности очагов крупных землетрясений.

Важнейшим является то обстоятельство, что для крупных карьеров зона, в которой изменения кулоновских напряжений на плоскости разлома превышают несколько десятых мегапаскалей, имеет значительный размер и ее площадь значительно превышает площадь зоны нуклеации землетрясений с магнитудой $M \leq 6$. Поскольку открытые горные работы в большинстве случаев не влияют ни на механические характеристики массива на глубине гипоцентра, ни на жесткость разлома, то наиболее вероятно, что независимо от антропогенной деятельности, энергия деформации, накопленная в массиве, рано или поздно реализовалась бы именно в виде динамической подвижки. Горные работы лишь приблизили момент землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с.
2. Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 68–73.
3. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. — 2016. — № 2. — С. 22–44.
4. Сейсмичность при горных работах / под ред. Н. Н. Мельникова — Апатиты: КНЦ РАН, 2002. — 325 с.
5. Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2011. — 184 с.
6. Адушкин В. В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59. — № 5. — С. 709–724.
7. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 41–46.
8. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. ($M_L = 6.1$) в Кузбассе — сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2016. — Т. 43. — № 4. — С. 34–60.
9. Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Цирель С. В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 20–34.
10. Кочарян Г. Г., Будков А. М., Кишкина С. Б. Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4.
11. Батугин А. С. Тектонофизические условия проявления техногенных землетрясений // Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых: Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 17–19 ноября 2015 г. — Кемерово, 2015. — С. 36.
12. Решетняк С. П., Федотова Ю. В., Савченко С. Н. Особенности проектирования формы глубоких карьеров с учетом напряженно-деформированного состояния вмещающего массива горных пород // Зап. Горного института. — 2012. — Т. 197. — С. 169–173.

13. **Ловчиков А. В., Савченко С. Н.** О техногенной природе Бачатского землетрясения 18.06.2013. // Четвертая тектонофизическая конференция ИФЗ РАН “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”: материалы докл. всерос. конф. с междунар. участием. — 2016. — С. 478–480.
14. **Ловчиков А. В.** Некоторые закономерности проявления герно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на рудниках России // Прогноз и предупреждение тектонических горных ударов и землетрясений: измерение деформаций, остаточных и действующих напряжений в горных породах: материалы Первого междунар. симп. — 2016. — С. 39–49.
15. **Ляв А.** Математическая теория упругости. — М: ОНТИ, 1935.
16. **Флорин В. А.** Основы механики грунтов. Т. 1. — Л.: Стройиздат, 1959. — 360 с.
17. **Флорин В. А.** Основы механики грунтов. Т. 2. — Л.: Стройиздат, 1959. — 541 с.
18. **Короткин В. Г.** Объемная задача для упруго-изотропного пространства // Сборник Гидроэнергопроекта. — Л.: ГОНТИ, 1938. — № 4. — С. 52–85
19. **Das S. and Scholz C. H.** Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1983, Vol. 71, No. 5. — P. 1669–1675.
20. **King G. C. P., Stein R. S., and Lin J.** Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1994, Vol. 84, No. 1. — P. 935–953.
21. **Felzer K. R. and Brodsky E. E.** The absence of stress shadows, *Seismol. Res. Lett.*, 2003. — Vol. 75. — P. 285.
22. **Кочарян Г. Г.** Геомеханика разломов. — М.: ГЕОС, 2016. — 424 с.

Поступила в редакцию 2/VII 2018