

УДК 550.34; 622.83

СИЛЬНЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

© 2023 г. С. Б. Кишкина^{1, *}, А. М. Будков¹, Г. Г. Кочарян¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: KishkinaS@idg.ras.ru

Сильные техногенные землетрясения остаются одним из чувствительных для общества информационных поводов, вызывающих обеспокоенность людей. Помимо этого, изучение техногенных землетрясений предоставляет шансы выявить причинно-следственные связи в процессе подготовки и зарождения события, установить параметры, которые могут использоваться для контроля над протекающими процессами. В статье обобщены результаты работ последних лет, посвященных вопросам возникновения сильных техногенных землетрясений в районах добычи твердых полезных ископаемых. Описаны условия инициирования динамических событий сдвигового типа. Проанализированы изменения кулоновских напряжений $\Delta\sigma_c$ на плоскости разлома, а также различные факторы, способные вызвать подобные изменения. Показано, что если изменения кулоновских напряжений достигают нескольких десятых МПа на плоскости разлома значительного размера, существенно превышающего площадь зоны нуклеации землетрясения, то даже небольшой величины $\Delta\sigma_c$, составляющей единицы процентов от уровня естественных напряжений, может оказаться достаточно для инициирования сейсмогенерирующих подвижек по напряженному разлому. Расчеты, выполненные для больших карьеров, занимающих около 20 км² (как разрез «Бачатский» в Кузбассе), продемонстрировали, что извлечение и перемещение масс горной породы на такой площади может приблизить момент возникновения землетрясения с магнитудой $M \sim 6$, уже подготовленного естественной эволюцией горного массива. При этом формирование больших отвалов породы в ходе разработки таких крупных карьеров не способствует инициации крупных сейсмических событий. Разветвленная сеть подземных выработок в окрестности тектонического разлома оказывает заметное влияние на эффективную жесткость массива и на возможность возникновения динамических подвижек. Однако практикуемая закладка камер разрушенной породой существенно снижает вероятность такого негативного сценария. Рассмотрен, также, вопрос дискриминации естественных и техногенных событий, поскольку он важен не только для общественного мнения, но и для разделения зоны ответственности государственных структур и страховых компаний, с одной стороны, и компаний, эксплуатирующих недра, с другой. Выделенные типы и параметры антропогенных воздействий помогут обоснованно определять ограничения на те или иные виды работ, что, в свою очередь, понизит вероятность возникновения катастрофических землетрясений в районах горных работ. Кроме того, потенциал возникновения техногенных землетрясений необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности, особенно в районах расположения ответственных энергетических и инженерных объектов.

Ключевые слова: техногенные землетрясения, инициированная сейсмичность, триггерная сейсмичность, горные работы, зона нуклеации землетрясения, разломная зона, кулоновское напряжение, карьер, горная выработка, отвальное сооружение.

Для цитирования: Кишкина С.Б., Будков А.М., Кочарян Г.Г. Сильные техногенные землетрясения в районах добычи твердых полезных ископаемых // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 2. С. 38–62. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_38

Введение

Проблеме возникновения сейсмических событий вследствие антропогенного воздействия уже более ста лет. Именно на рубеже 19 и 20 веков впервые была отмечена связь случившегося землетрясения с ведущимися в районе разработками в шахтах [Durrheim, 2010; Fougler et al., 2018]. Такие землетрясения стали называть «техногенными», чтобы указать на существующую связь с

антропогенным воздействием, технологиями, развиваемыми человеком, поскольку со временем подобные события стали происходить не только в районах горных работ, но и в связи со строительством больших водохранилищ, разработкой углеводородов, геотермальных месторождений и пр. [Шемякин и др., 1986; Gibowich, Kijko, 1994; Сейсмичность..., 2002; Ружич и др., 2009; Маловичко, Маловичко, 2010; Назаров и др., 2011; Ellsworth, 2013; Еманов и др., 2014; Адушкин, Турунтаев, 2015; Адушкин и др., 2017; Fougler et al., 2018; Li et al., 2019].

Техногенные землетрясения остаются одним из чувствительных для общества информационных поводов. Прежде всего, это касается достаточно сильных сейсмических событий, которые вызывают наибольшую обеспокоенность людей. Несомненно, информационные поводы могут дать и не слишком сильные ($M \sim 2-3$), но достаточно частые землетрясения. Примером способны служить последовательности слабых землетрясений, которые возникали в районах открытия геотермальных станций, вызывая страх и беспокойство жителей [Deichmann, Giardini, 2009]. Что, в некоторых случаях, принудило приостановить или даже закрыть – как это произошло с известным Базельским геотермальным проектом (Deep Heat Mining, Швейцария) – добычу. Подобная ситуация наблюдалась в центральных областях США, когда вследствие активизации добычи нефти путем гидроразрыва пласта в сотни раз увеличилось число слабых землетрясений; и в Ланкашире (Англия), где ведется добыча сланцевого газа; и пр. Интересно, что публикации социологических опросов населения отмечают мнение, например, большинства опрошенных британцев (имеющих базовые знания о добыче сланцевого газа), которые «не согласились с тем, что риски гидроразрыва пласта можно компенсировать за счет платежей местным сообществам» [Howell, 2018]. Так что обеспокоенность жителей может быть весьма серьезной проблемой, не имеющей простого решения даже путем финансового вливания.

Достаточно сильные землетрясения с магнитудой $M > 4$ уже могут вызывать не просто беспокойство, но и заметные повреждения. Так, в результате мощного землетрясения в Пхохане ($M_w = 5.4-5.5$, 15.11.2017, Южная Корея), которое было спровоцировано работой геотермальной станции, пострадало больше ста человек и больше полутора тысяч остались без крова. При этом отмечалось, что «разломы в регионе, способные вызвать умеренные или сильные землетрясения», уже были «критически напряжены» [Summary..., 2019; Lee et al., 2019].

Одно из первых документально подтвержденных сильных ($M_L = 5.3$) техногенных землетрясений на горном производстве произошло в Австралии 18.12.1925 г. [Foulger et al., 2018]. Самое сильное на сегодняшний день техногенное землетрясение также связано с производством горных работ. Оно произошло в районе разреза Бачатский (18.06.2013, Кузбасс, РФ) и имело магнитуду $M_L = 6.1$ (по [Еманов и др., 2014]). Землетрясение вызвало не только сильный общественный резонанс, но и разрушения разной степени в сотнях домов окрестных поселков. Некоторые города Кузбасса оказались в пятибалльной зоне колебаний. Землетрясение ощущалось не только в Кемеровской области, но и в Томской, Новосибирской областях, Алтайском крае и Республике Горный Алтай.

Именно сильные события с магнитудой $M > 4$, потенциально возможные или происходящие в районах горных работ, будут основной целью анализа данной работы.

Однако не только резонансные события побуждают научное сообщество заниматься вопросами техногенной сейсмичности. При изучении таких событий появляется дополнительный шанс изучить механизм возникновения землетрясения (скольжения разлома), определить критерии его старта. Дело в том, что очаговые области сильных техногенных землетрясений расположены не так глубоко, как у многих природных землетрясений; следовательно, они более доступны для изучения. А в случае землетрясений, связанных с горными работами, иногда появляется возможность визуального наблюдения в шахте [Heesakkers et al., 2011]. В таких случаях есть надежда проследить причинно-следственные связи в процессе их подготовки и зарождения; попытаться установить параметры, которые могут использоваться для контроля над протекающими процессами.

Рассмотрим подробнее, что такое сильное техногенное землетрясение и оценим, какими могут быть причины, определяющие его возникновение.

Парадигма

Очертим основные положения, которые лежат в основе используемых нами подходов к решению поставленной задачи.

I. За последние десятилетия в геофизике и геомеханике четко сформировалось представление о том, что землетрясение – это процесс скольжения по тектоническому разлому [Кочарян, 2014; 2015; 2016]. Такая уверенность возникла как в результате анализа данных широчайшего использования сейсмической и геодезической аппаратуры (в том числе с применением спутниковых технологий), так и в результате анализа данных глубокого бурения в зонах разломов, изучения характеристик горных пород, добытых с эксгумированных участков разломов, визуального наблюдения участков разломов в глубоких шахтах. Наиболее сильные землетрясения происходят, чаще всего, на крупнейших разломах, на границах плит. Источники большинства средних и небольших землетрясений расположены либо в зонах влияния таких крупнейших разломов, либо на более мелких разрывных нарушениях, в том числе и в континентальных областях. Вулканический тремор не рассматривается.

II. Структура разломной зоны сложна и существенно различается на поверхности и на сейсмогенных глубинах. За последние два десятилетия на многих участках суши и океанического дна были осуществлены проекты по бурению через активные разломные зоны [Кочарян, 2021], которые подтвердили, что наблюдаются весьма существенные вариации структуры разломных зон по падению или простираанию даже на сравнительно коротком расстоянии. Разрешения стандартных геофизических методов, с помощью которых получают основные характеристики разломов, оказывается во многих случаях недостаточно для их оценки, а иногда и для выявления.

III. Разломные зоны являются связующим звеном между земными недрами и биосферой, каналами перемещения флюидов, структурами, адаптирующими напряжения, накапливаемые в коре [Кочарян, 2016].

IV. Месторождения полезных ископаемых (как и границы осадочных бассейнов, содержащих запасы углеводородов и т.д.) приурочены к разломным зонам.

V. Техногенные землетрясения подразделяют на индуцированные и инициированные. Считается, что индуцированные события (они же «наведенные» или «вызванные») происходят в результате техногенной деятельности, т.е. в результате деятельности человека. Это, как правило, слабые землетрясения с магнитудами не выше $M = 2.5$, источники которых по пространственным и временным параметрам явно сопровождают зоны производства горных работ [Gibowicz, Kijko, 1994; Гончаров, Куликов, 2010; Змушко и др., 2011; Адушкин и др., 2017]. Индуцированные события происходят в результате постепенного накопления деформаций при длительном многократном воздействии, которое со временем может либо затухнуть, либо развиться в динамическое событие. В случае инициированного (триггерного) события деятельность человека вносит лишь малую долю в изменение напряженного состояния среды, является последним толчком, триггером уже подготовленного природой события. Такие события могут иметь магнитуды вплоть до $M = 6$ [Кочарян, 2016; Foulger et al., 2018]. Оговорим, что если не указана магнитуда конкретного землетрясения, будем использовать общее обозначение M , поскольку разница между категориями магнитуд в данной постановке задачи для нас несущественна.

Индуцированные и инициированные явления можно разграничить, оценивая время воздействия. Когда длительность антропогенного вмешательства в напряженно-деформированное состояние массива горных пород сопоставима или превышает время подготовки динамического события соответствующей магнитуды, событие следует отнести к индуцированным. Так происходит, например, при возникновении слабой сейсмичности в ходе горных работ. Инициированное землетрясение происходит в результате кратковременного, по сравнению с длительностью естественного цикла подготовки, воздействия. Предполагается, что при отсутствии техногенного воздействия такое событие произошло бы существенно и даже принципиально позже [Адушкин и др., 2017].

Граница между этими типами явлений довольно размыта, и часто в научной литературе их не различают.

VI. Сильные техногенные землетрясения, связанные с горными работами, это инициированные техногенной деятельностью динамические подвижки по крупным разломам (которые еще называют «техногенно-тектонические» или «природно-техногенные» землетрясения, или триггерные события [Шемякин и др., 1986; Яковлев и др., 2013; Батугин, 2015; Адушкин, 2016]). Очаги таких событий приурочены к уже существующим разломам, расположенным, в среднем, на глубине не более 4–5 км [Foulger et al., 2018] и могут обнаруживаться на удалении от фронта ведущихся горных работ [Адушкин и др., 2017]. Будем относить к этому типу события с магнитудами $M > 4$ ($E_s > 10^9$ Дж).

VII. Динамическое скольжение может быть инициировано лишь на тех разломах, для которых выполняются геомеханические критерии возникновения динамической подвижки по крупным разломам [Peng, Gombert, 2010; Кочарян, 2016; Кочарян и др., 2018а; 2019б]. Это: A – близость величины эффективных напряжений, касательных к плоскости разлома, локальному или текущему пределу прочности $\tau \sim \tau_0$; B – скоростное разупрочнение, т.е. снижение фрикционной прочности контакта с ростом скорости скольжения v и/или перемещения

$$D \frac{d\tau_{fr}}{dv} < 0, \frac{d\tau_{fr}}{dD} < 0.$$

Возможность реализации режима фрикционного разупрочнения определяется Р-Т условиями, структурными и физико-механическими свойствами геоматериала, из которого сложена область скольжения [Scholz, 1998; Кочарян и др., 2017]; C – жесткость вмещающего массива K ниже жесткости разлома k_s на ветви разгрузки

$$|k_s| = \left| \frac{\partial \tau}{\partial D} \right| \geq K = \eta \frac{G}{\hat{L}}.$$

Здесь G – модуль сдвига вмещающего массива; $\eta \sim 1$ – коэффициент формы; \hat{L} – характерный размер, связанный с магнитудой землетрясения [Кочарян, 2016; Кочарян, Батухтин, 2017].

При выполнении таких геомеханических критериев возникает возможность изменения режима деформирования разломной зоны. Если для разлома, расположенного в окрестности зоны ведения горных работ, выполняются условия достижения предельной прочности A и скоростного разупрочнения B , но не выполняется условие C , налагаемое на соотношение жесткостей разлома и массива, то динамические срывы по разлому не происходят, а вся накопленная энергия деформации реализуется путем крипа или событий медленного скольжения без излучения сейсмических волн [Peng, Gombert, 2010; Кочарян, 2016].

Техногенные факторы, способные инициировать подвижку по разлому

Начнем с того, что участок, на котором выполняются условия A – C старта скольжения разлома, не может быть сколь угодно малым, поскольку в таком случае скольжение не будет реализовано. Для того чтобы процесс развивался, необходимо, чтобы размер этой зоны превышал некоторую критическую величину L_c .

Для оценки размера участка L_c , на котором должны выполняться геомеханические критерии возникновения динамической подвижки, обратимся к одному из ключевых понятий процесса развития землетрясения — зоне нуклеации. По [Scholz, 1998], зона нуклеации — это участок разлома, на котором скорость разрыва возрастает до динамического значения; его еще называют зоной зарождения землетрясения.

Для возникновения фрикционной неустойчивости этот характерный размер определяется выражением:

$$L_c \geq \frac{\eta \cdot G D_c}{\sigma_n \cdot (b - a)}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига материала, σ_n – эффективное напряжение, нормальное к плоскости скольжения, D_c , b , a – константы, определяемые фрикционными свойствами контакта, η – коэффициент формы (величина ~ 1) [Scholz, 1998; Кочарян, 2016]. Хорошо видно, что при понижении уровня нормальных напряжений σ_n размер зоны зарождения будет расти. Именно с этим связано то обстоятельство, что очагов землетрясений на малых глубинах почти не бывает. Для Калифорнии, например, «сейсмогенная граница» проходит на глубине 3–4 км [Scholz, 1998]. Те, сверхмалые глубины гипоцентров, которые приводятся в некоторых каталогах, чаще всего связаны с неточностью оценки.

На рис. 1 приведена величина критического размера зоны нуклеации землетрясения в зависимости от его магнитуды, рассчитанная разными авторами путем детального анализа области первых вступлений сейсмограмм, а также экстраполяцией результатов лабораторных экспериментов и численных расчетов на натурный масштаб [Ellsworth, Beroza, 1995; Papageorgiou, Aki, 1983; Ide, Takeo, 1997; Кочарян, 2016].

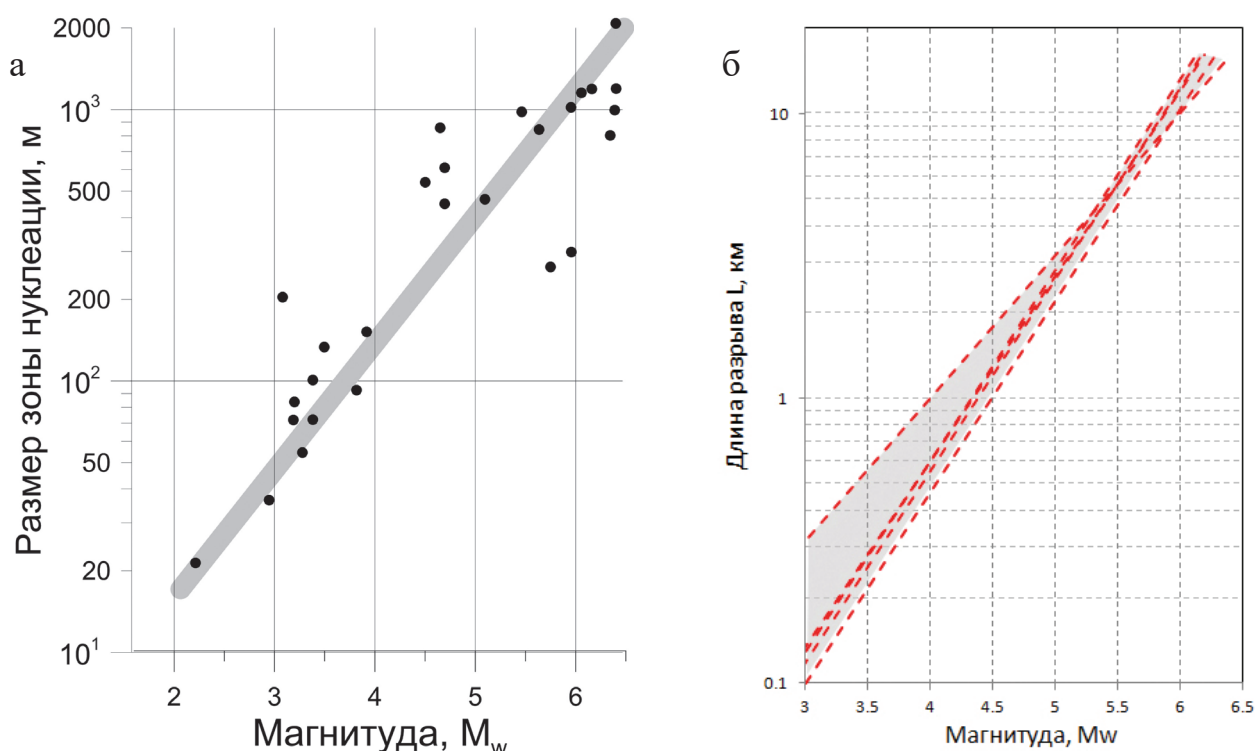


Рис. 1. Величина критического размера зоны нуклеации (а) и зависимость размера разрыва землетрясения (б) от магнитуды (по [Кочарян, 2016])

Оценка более распространенного параметра: длины разрыва – приведена на рис. 1б. Здесь мы воспользовались результатами обобщения параметров разрывов, проведенного в [Кочарян, 2014; 2016] для землетрясений с глубиной гипоцентра не более 50 км в широком диапазоне моментных магнитуд; однако ограничились только интересующим нас диапазоном. Красными линиями на рисунке приведены разные регрессионные зависимости, использованные в [Кочарян, 2014; 2016]. Видно, что землетрясения с магнитудой $M \sim 4$ имеют разрыв в диапазоне от 0.5 до 1.0 км. Для событий с магнитудой $M \sim 6$ разрыв достигает 10 км. Для землетрясений с $M < \sim 6.0$ можно пренебречь различиями между событиями с разными механизмами при проведении анализа размеров очага. Для более крупных разрывов такое пренебрежение уже не корректно, поскольку тектоническая обстановка оказывает существенное влияние на соотношения между параметрами [Wells, Coppersmith, 1994; Кочарян, 2016].

Сопоставляя зависимости рис. 1, можно видеть, что размер зоны нуклеации L_c составляет примерно 10% от длины разрыва землетрясения. Тогда характерные размеры зоны нуклеации событий с магнитудами, например, $M \sim 4$ не должны превышать 100 м. Магнитуда Бачатского землетрясения,

самого сильного на сегодняшний день техногенного события, связанного с горными работами, оценивается от $m_b = 5.2$ (ВЛ – Китайский сейсмологический центр) и $m_b = 5.8$ (MOS – геофизический центр РАН) до $m_b = 6.1$ (NNC – Казахстанский центр сейсмических данных). Локальная магнитуда $M_L = 6.1$ [Еманов и др., 2014]. Для такого землетрясения размер зоны нуклеации должен соответствовать ~ 1 км.

Очевидно, что если речь идет о возможном техногенном воздействии на разломную зону, то размеры области такого воздействия должны заметно превышать размеры зоны нуклеации потенциального землетрясения, поскольку вероятность того, что зона влияния горных работ в точности совпадет с подготовленным к скольжению участком разлома (с участком L_c области нуклеации землетрясения) крайне мала.

Итак, в результате приведенных выше оценок, можно определить масштабы участка, на котором должно происходить изменение условий скольжения, связанное с техногенной деятельностью.

Рассмотрим, какими могут быть техногенные воздействия или техногенные факторы, способные реализовать выполнение сформулированных условий на участке разлома размером более километра и на глубине нескольких километров.

Инициирование сейсмическими колебаниями

Физическая суть процесса инициирования землетрясения любого генезиса сейсмическими волнами на сегодняшний день не вполне ясна. Однако подтвержденные примеры землетрясений, которые были вызваны или инициированы другими сейсмическими источниками – землетрясениями, расположенными на расстоянии сотни и даже тысячи километров, – действительно известны [Freed, 2005; Hill, Prejean, 2007]. Наиболее изученным событием–триггером стало землетрясение Landers 28.05.92, ($M_w = 7.3$), произошедшее в Южной Калифорнии [Hill et al., 1993; Gomberg, 1996]. Анализ десятков и даже сотен землетрясений, которые были инициированы Landers, позволил сделать вывод о том, что достижение некоторого уровня динамического напряжения в районе потенциального очага не может определять возникновение подвижки: при близком уровне динамических напряжений в разных районах землетрясения могли происходить или нет. В работе [Gomberg, 1996] было выдвинуто предположение о субкритическом, метастабильном состоянии разломов, на которых происходят инициированные землетрясения. Обобщения целого ряда инициированных колебаниями от удаленных землетрясений сейсмических событий, приведенные в работе [Кочарян, 2016], позволили выявить некоторые закономерности. Так, на участках, где регистрировались такие события, отмечались деформации, нараставшие со скоростями, которые на порядки превышали фоновые значения. В большинстве случаев возникновение динамически инициированных сейсмических событий связывается с воздействием низкочастотных поверхностных волн с периодами 20–40 с. Большая часть инициированных источников ассоциируется с зонами растяжения, участками увеличенной фоновой сейсмичности, геотермальными областями и зонами четвертичного и современного вулканизма. Возникновение динамически инициированной сейсмичности начинается не с первого вступления P волны, а через некоторое время после вступления высокоамплитудных поверхностных волн.

В результате деформаций, вызванных дислокацией в очаге землетрясения, возникают статические изменения [Кочарян, 2016]. Они независимы от времени (практически мгновенны) и необратимы [Das, Scholz, 1983; Harris, 1998; Stein, 1999; King, Cocco, 2001]. В зависимости от геометрии очага землетрясения, расположения и ориентации относительно него соседних разломов, изменение поля напряжений в результате подвижки может либо «подтолкнуть» соседние разломы несколько ближе к порогу разрушения, либо, наоборот, сделать их стабильнее. Подобный механизм процесса инициирования одного землетрясения другим обычно описывают при помощи оценки функции Кулона на оптимально ориентированном разломе:

$$\sigma_c = \tau - \mu(\sigma_n - p), \quad (2)$$

где σ_n и τ – нормальное и касательное к плоскости разлома напряжения, p – поровое давление

и μ – коэффициент трения. Понятие «оптимально ориентированный разлом» предполагает, что плоскость разлома или трещины оптимально – с точки зрения возможного разрушения – ориентирована относительно регионального поля напряжений и изменения напряжения, вызванного рассматриваемым событием. Фактически, разбирается сценарий, который с максимальной долей вероятности может привести разлом к разрушению. Для простоты рассматривается плоский случай (рис. 2). Ориентация такой площадки в разных точках будет меняться. Представляя в плоскости нормальные и касательные напряжения через компоненты тензора напряжений, получим

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (4)$$

В однородной изотропной упругой среде с главными напряжениями σ_1 и σ_3 , действующими на площадку, максимум функции $\sigma_c(\beta) = \tau - \mu\sigma_n$ достигается при условии, что площадка находится под углом β к плоскости разрушения, где $\tan 2\beta = \frac{1}{\mu}$.

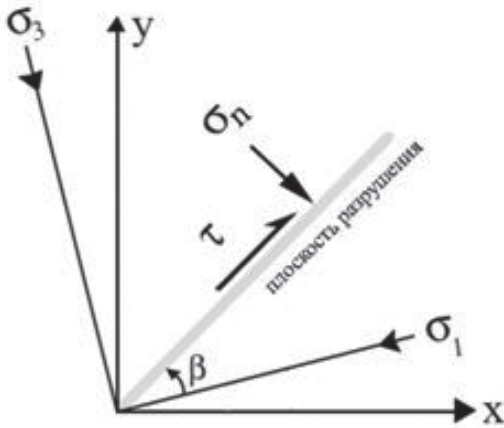


Рис. 2. Система осей, используемая для расчета кулоновских напряжений на оптимальных плоскостях разрушения. Положительными считаются сжатие и правосторонний сдвиг

На стадии подготовки динамического срыва $\sigma_c < 0$. В случае увеличения касательного напряжения или снижения эффективного нормального напряжения ($\sigma_n - p$) разлом приближается к критическому состоянию $\sigma_c = 0$. Даже не зная абсолютных величин напряжений, можно вычислить изменение функции Кулона, используя инкрементальное уравнение:

$$\Delta\sigma_c = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n - \Delta p), \quad (5)$$

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 ($\Delta\sigma_c < 0$). Для этих расчетов не требуется сведений о НДС в регионе, и не рассматриваются поля напряжений от других источников. По данным [King et al., 1994], многократно подтвержденным другими исследователями [Hardebeck et al., 1998; Lin, Stein, 2004; Toda et al., 2005; и др.], изменения $\Delta\sigma_c$ на величину около 0.1–0.3 МПа бывает достаточно для инициирования сейсмичности: именно в таких областях отмечается максимальное распространение афтершоков. Области, в которых получены значения $\Delta\sigma_c$, уменьшившиеся примерно на такие же величины 0.1–0.3 МПа, наоборот, характеризуются отсутствием афтершоковой активности, что заставило предположить эффект «сдерживания» сейсмичности при подобном снижении.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчета кулоновских напряжений для Бачатского землетрясения, которые были выполнены с помощью программы Coulomb [Toda et al., 2011] в

модели упругого полупространства с однородными изотропными упругими свойствами [Кишкина, Кочарян, 2021]. Показаны примеры расчета для плоскости разлома, падающего под углом 10° (а) и

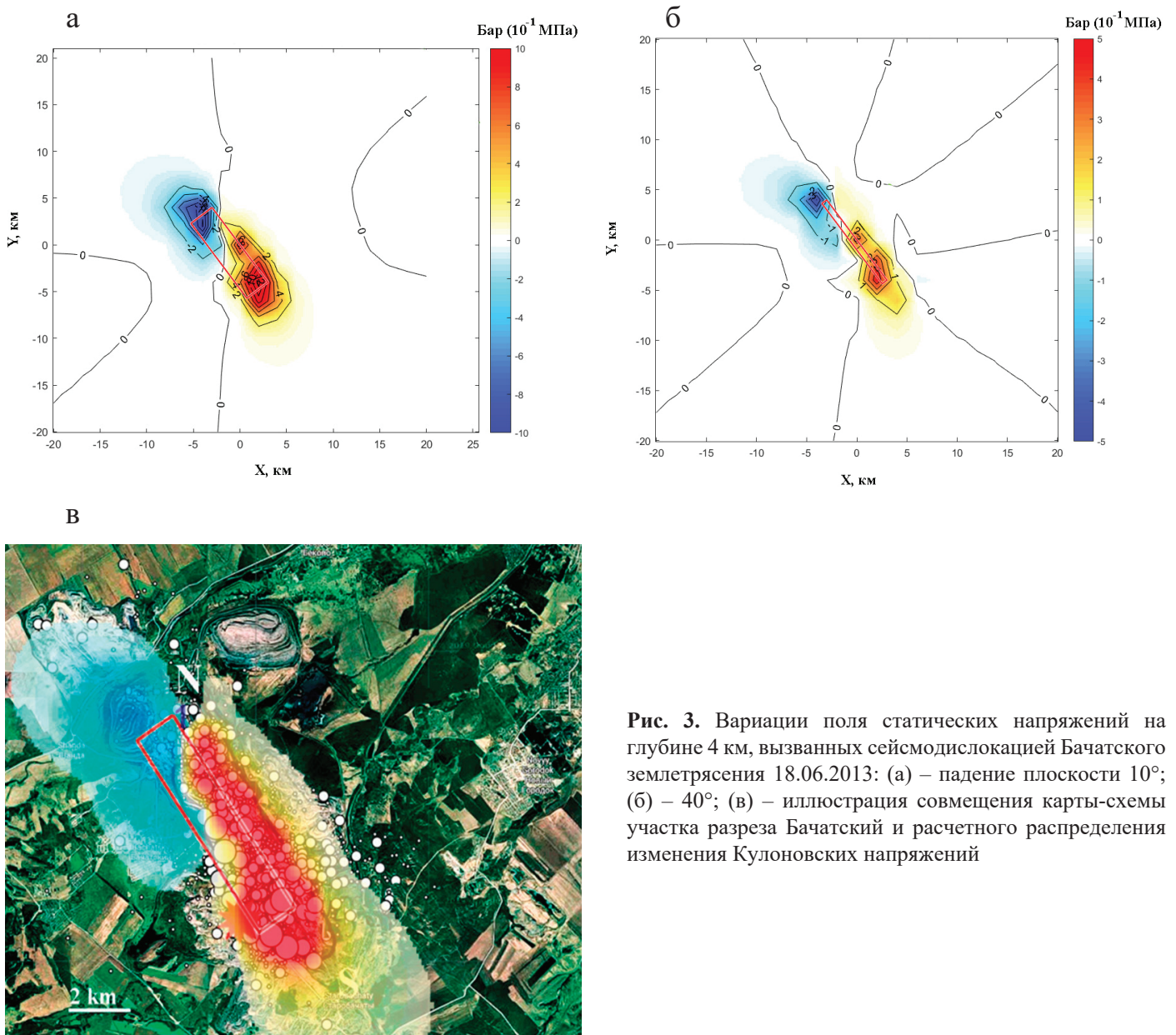


Рис. 3. Вариации поля статических напряжений на глубине 4 км, вызванных сейсмодислокацией Бачатского землетрясения 18.06.2013: (а) – падение плоскости 10° ; (б) – 40° ; (в) – иллюстрация совмещения карты-схемы участка разреза Бачатский и расчетного распределения изменения Кулоновских напряжений

40° (б). Приведенная оценка изменений поля статических напряжений, вызванных землетрясением, демонстрирует, что облако эпицентров афтершоков наиболее насыщено там, где кулоновское напряжение на оптимально ориентированных разломах увеличилось более чем на 0.1 МПа (рис. 3в).

Отметим, что согласно результатам расчетного моделирования, подобные изменения поля напряжений произошли только в окрестности Бачатского разреза радиусом 10–20 км.

Величины около десятой доли МПа составляют весьма малую часть общего сброса напряжений при землетрясении, так что подобные квазистатические изменения напряжений могут служить только триггером, последним толчком к старту уже подготовленного землетрясения. Или наоборот, способны немного задержать этот старт.

Убедительные свидетельства землетрясений, которые были вызваны или инициированы другими сейсмическими источниками, появились только в XXI веке. А в середине XX века много внимания уделялось исследованию возможности инициирования землетрясений ядерными взрывами [Emiliani

et al., 1969; Николаев, Верещагина, 1991а, б; Тарасов, Тарасова, 1995]. Однако убедительных доказательств способности сейсмических волн ядерного взрыва изменять сейсмический режим на больших расстояниях так и не было представлено, хотя были подтверждены факты афтершоковой активности вблизи эпицентров взрывов [Richards, Exstroem, 1995; Николаев, Верещагина, 1999; Адушкин, Спивак, 2007]. В работе [Boucher et al., 1969] исследовали возможность наведенной сейсмичности, связанной с ядерными испытаниями в Неваде. Они сообщили о землетрясениях после всех испытаний, при которых сами взрывы имели магнитуду $m_b \geq 5.0$. Крупнейшее наведенное землетрясение было, по крайней мере, на единицу магнитуды меньше, чем индуцирующий взрыв. Часть инициированных землетрясений была связана с коллапсом полости взрыва. В большинстве случаев, в которых упоминалась связь взрывов и удаленной сейсмичности, не было выполнено тщательного статистического анализа, который позволил бы судить о достоверности отмечаемой причинно-следственной связи. Что объясняется, в первую очередь, недостаточным в то время уровнем развития сейсмических сетей, аппаратуры и методов обработки сигналов.

Сопоставив эффекты инициирования сейсмических событий подземными ядерными взрывами на Невадском полигоне и землетрясениями сопоставимой со взрывами магнитуды, произошедшими в этом же регионе, авторы работы [Parsons, Velasco, 2009] пришли к выводу, что инициирующий потенциал взрывов крайне мал по сравнению с землетрясениями. Были выдвинуты две причины, которые могут определять подобный эффект. Во-первых, изменения статического поля напряжений при взрывах практически отсутствуют, тогда как в ближней зоне землетрясений афтершоки определяются именно вариациями статического поля в результате подвижки по разлому. Во-вторых, при взрыве относительно невелики амплитуды колебаний в низкочастотных поверхностных волнах, которые являются основным инициирующим фактором при землетрясениях.

Оценки возможности модели инициирования землетрясения сейсмическими волнами от химических массовых взрывов демонстрируют, что эффект таких воздействий существенно ниже, чем эффект воздействия землетрясений [Кочарян и др., 2019а, б]. На глубине 3–5 км, характерной для сильного техногенного события, динамические напряжения в сейсмической волне от крупного карьерного взрыва достигают величин всего в несколько кПа (деформации не превышают $\sim 10^{-7}$ отн. ед.).

В работах [Кочарян и др., 2004; Кочарян, 2012; 2016] рассмотрена еще одна возможность инициирования сейсмических событий: путем накопления малых деформаций. Предполагается, что в зависимости от фонового режима деформирования колебания в массиве способны создать условия для перераспределения накопленной энергии деформации [Кочарян, 2012]. Оценки результатов прецизионных измерений остаточных перемещений при воздействии сейсмических колебаний от взрывов [Адушкин и др., 2009; Кочарян, 2016] показали, что вероятное остаточное перемещение по разлому в таких случаях не превышает десятков микрон (величины около 1 мм достигаются в экстремальных случаях). Так что при перемещениях, вызванных даже крупными взрывами на карьерах, прямое инициирование землетрясения значительной магнитуды практически невозможно: согласно сейсмологическим данным величина критического перемещения для землетрясения $M \sim 6$ должна быть в сто раз выше [Elthworth, Beroza, 1995; Scholz, 2002].

Возможность изменения текущей прочности разлома и его жесткости, которая возникает в результате локальных изменений порового давления за счет перетоков флюида при воздействии сейсмических колебаний на напряженный разлом, отнесем к категории изменения флюидодинамического режима в зоне разлома.

Перемещение больших объемов породы при ведении горных работ

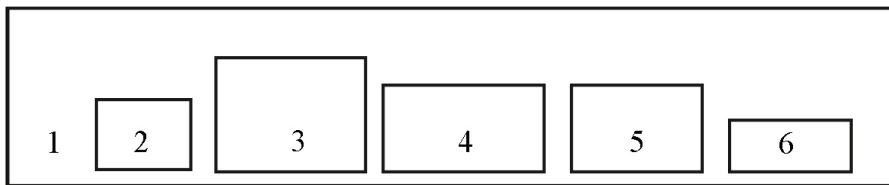
Выемка и перемещение породы также не способны оказать непосредственного влияния на свойства разлома или вмещающего массива в окрестности потенциального очага сильного техногенного землетрясения, поскольку очаг такого события, как мы рассмотрели выше, расположен на глубине нескольких километров. Потенциально горные работы могут оказать влияние только на параметры поля

напряжений, т.е. на выполнение критерия A – достижения локального предела прочности. Очевидно, что абсолютные величины вариаций естественного поля на глубине в несколько километров невелики по сравнению со значениями литостатических напряжений. В данном случае в качестве возможного иницирующего фактора следует оценивать изменение параметров поля напряжений. Рассмотрим параметры вариаций в зависимости от глубины, размеров выемки и угла падения разлома для разных сценариев перемещения больших объемов породы. Это может быть поверхностная выемка породы при разработке карьеров; сооружение отвальных объектов, т.е. складирование отработанной породы на поверхности; или подземная выемка породы в ходе разработки шахт.

Численные и аналитические расчеты воздействия на статическое поле напряжений путем разгрузки массива из-за образования котлована и дополнительной пригрузки из-за формирования отвалов породы были проведены для карьеров и отвалов Кузбасса и Горловского угольного бассейна [Кочарян, Кишкина, 2018; Кочарян и др., 2019а, б; Кишкина и др., 2021]. Оценки воздействия шахтной выработки проводились на модели шахты им. Губкина (КМА, Коробковское месторождение) [Кочарян и др., 2018а; 2019б].

Поверхностная выемка больших объемов породы при ведении горных работ

Вариации кулоновского напряжения непосредственно под котлованом и в окрестности выработки разреза были рассчитаны для карьера Бачатский (Кузбасс) $10.0 \times 2.0 \times 0.3$ км, и нескольких моделей карьеров Горловского бассейна с размерами, соответствующими разрезам Северный – $1.5 \times 0.9 \times 0.2$ км, Крутихинский – $1.4 \times 0.6 \times 0.2$ км, Горловский – $1.1 \times 0.8 \times 0.2$ км, Восточный – $1.7 \times 1.3 \times 0.18$ км и Ургунский – $1.8 \times 0.9 \times 0.16$ км. При проведении всех расчетов полупространство предполагалось однородным с



плотностью $\rho = 2.8 \cdot 10^3$ кг/м³, коэффициент трения на площадке $\mu = 0.8$. Наглядное сравнение площади, занимаемой соответствующими разрезами на поверхности, приведено на рис. 4.

Для приближенных оценок изменения напряженно-деформированного состояния массива в результате выемки породы при открытых горных работах может быть использовано решение задачи Лява [Ляв, 1935]: на поверхности упругого полупространства к участку прямоугольной формы прикладывается нагрузка и оцениваются возникающие напряжения. Согласно оценкам [Короткин, 1938], выемку глубиной h можно заменить равномерным снятием нагрузки $\zeta z = \rho g h$. Выемка прямоугольной формы в данной постановке моделирует котлован карьера (рис. 5а). Особенности формы пренебрегаем.

Для расчетов были использованы аналитические решения задачи Лява, выполненные в работе [Короткин, 1938]. В качестве основных геометрических параметров использовались размеры, характерные для крупных карьеров горнодобывающих предприятий Кузбасса и Горловского бассейна. Более подробное описание расчетов приведено в [Кочарян, Кишкина, 2018; Кишкина и др., 2021].

На рис. 5б и 5в приведены зависимости изменения величины вертикальной компоненты напряжений $\Delta \sigma_z$ от глубины (вдоль центральной оси) для выемки с параметрами, близкими к соответствующим значениям для карьеров Бачатский (Кузбасс) и Восточный (Колыванское месторождение, Горловский бассейн). Плотность породы принята, соответственно, $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\rho = 2.6 \cdot 10^3$ кг/м³. Такая общая оценка показывает, что на глубине в несколько километров изменение вертикальной компоненты поля напряжений, возникшее в результате выемки породы, составляет величину менее процента от литостатического напряжения. Даже для такого огромного объекта как Бачатский карьер.

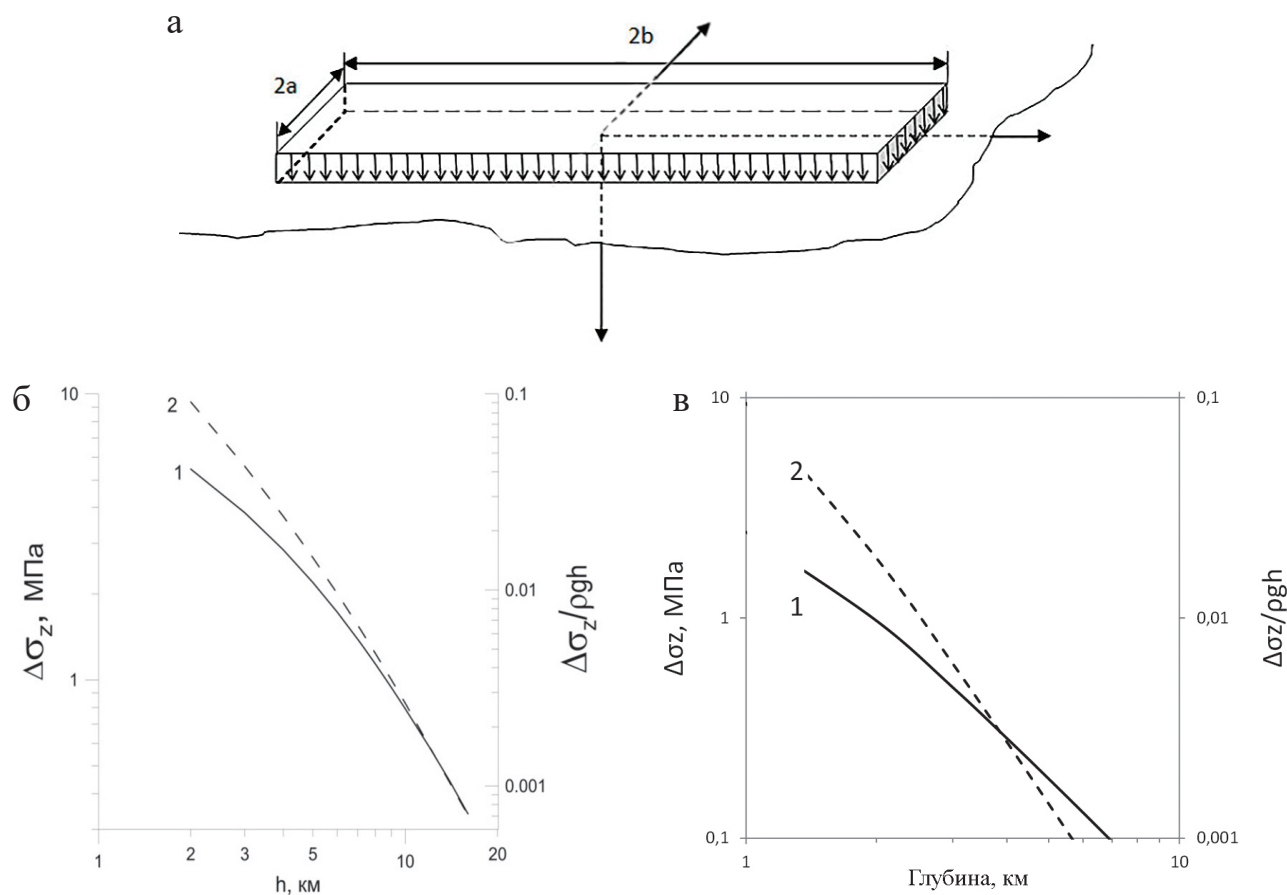


Рис. 5. Схема моделирования выемки карьера (а) и расчет изменения вертикальной компоненты напряжений под центром карьера (б, в). Расчет для модели карьера: б – Бачатский, глубина выемки 300 м, размеры в плане 2×10 км; $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; в – Восточный, глубина выемки 180 м, размеры в плане 1.7×1.3 км; $\rho = 2.6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

1 – абсолютная величина, 2 – нормированная на соответствующее значение литостатических напряжений

Часто это приводит к дальнейшим заключениям о незначительном влиянии выемки породы на напряженное состояние породного массива на вероятной глубине расположения очагов сейсмических событий. Однако, как мы рассматривали выше, даже столь незначительные величины не стоит расценивать как подтверждение невозможности инициирования подвижки по разлому, поскольку известно, что и небольшие изменения поля напряжений могут либо «подтолкнуть» разлом ближе к порогу разрушения, либо, наоборот, сделать его стабильнее [Das, Scholz, 1983; King et al., 1994; и др.].

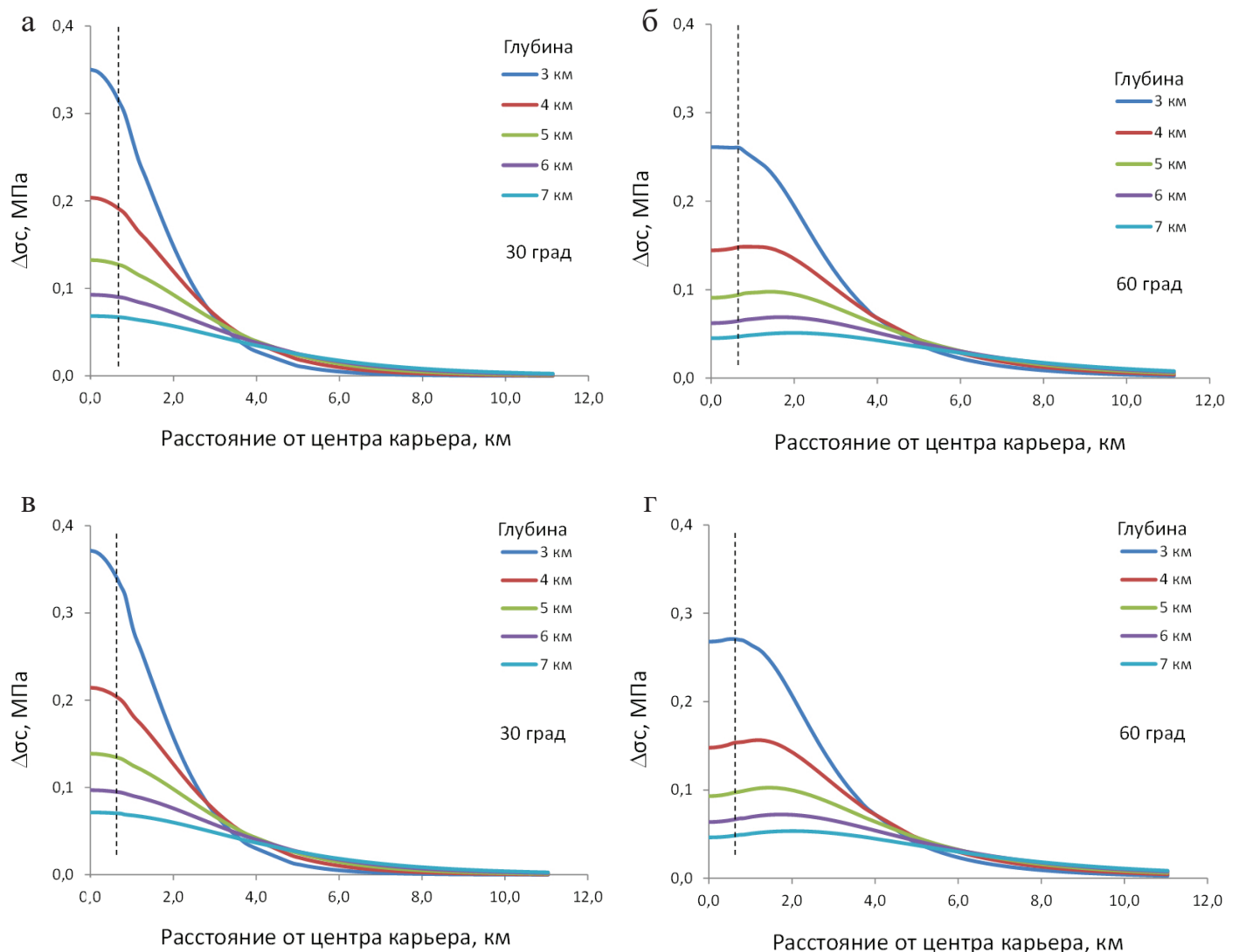
Чтобы оценить величину изменения поля напряжений под площадью карьера, используем моделирование на основе Кулоновской теории инициирования (5).

Достаточно точных характеристик разломов, подтвержденных бурением или детальным сейсмопрофилированием, к сожалению, у нас нет ни в случае Бачатского разреза, ни для карьеров Горловского бассейна. Исходя из этого, параметры глубинного строения разломов в районах моделируемых карьеров оценивались на основании имеющихся геологических карт и разрезов исследуемой территории, а также по аналогии с более изученными геологическими разрезами угледобывающих регионов [Кочарян, Кишкина, 2018; Кочарян и др., 2019а, б; Кишкина и др., 2021]. Учитывая, что достоверно установить углы падения разломов на предполагаемой глубине расположения очагов крупных событий (4–5 км) не представляется возможным, расчеты были проведены для большого диапазона значений (от 10 до 60 градусов) угла падения сейсмогенного разлома. При этом отметим, что современные представления о разломах диктуют нам, что на глубине нескольких километров они выполаживаются, т.е. имеют меньший угол падения, по сравнению с поверхностью Земли.

Так что именно малые углы падения наиболее вероятны. К тому же, учитывая достаточно слабую изученность районов и возможные допущения при составлении схем расположения разломов, при моделировании предполагался наиболее опасный сценарий, когда плоскость разлома располагается непосредственно под котлованом. Тогда как, согласно Базе данных активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017], наиболее потенциально активные региональные разломы Горловского бассейна расположены несколько в стороне от крупных разрезом Северный, Крутихинский и Восточный, пересекая участки расположения более мелких карьеров Выдрихинский, Горловский и Ургунский.

Примеры результатов расчета параметров поля напряжений под площадью и в окрестности карьеров приведены на рис. 6. Например, для карьера «Ургунский» Горловского бассейна, на площадке разлома с углом падения 30° вариация составляет величину $\Delta\sigma_c \sim 0.35$ МПа на глубине 3 км и $\Delta\sigma_c \sim 0.21$ МПа на глубине 4 км. За пределами границы выработки величина $\Delta\sigma_c$ быстро снижается и достигает безопасного уровня $\Delta\sigma_c \sim 0.1$ МПа уже на расстоянии около 2–2.5 км от границы карьера. Аналогичным образом ведет себя поле напряжений и в окрестности остальных разрезом. Безопасный уровень вариации напряжений на плоскостях разломов, расположенных на сейсмогенной глубине, достигается для разных разрезом на расстояниях от 1 до 2.5 км от границ горной выработки.

Результаты показали, что значимые положительные вариации функции Кулона (~ 0.3 МПа) на глубинах 3–4 км могут иметь место под выработками всех крупных разрезом. Однако за пределами границы выработки величина $\Delta\sigma_c$ быстро снижается и достигает безопасного уровня ~ 0.1 МПа на расстояниях от 1 до 2.5 км от границ горной выработки (рис. 6).



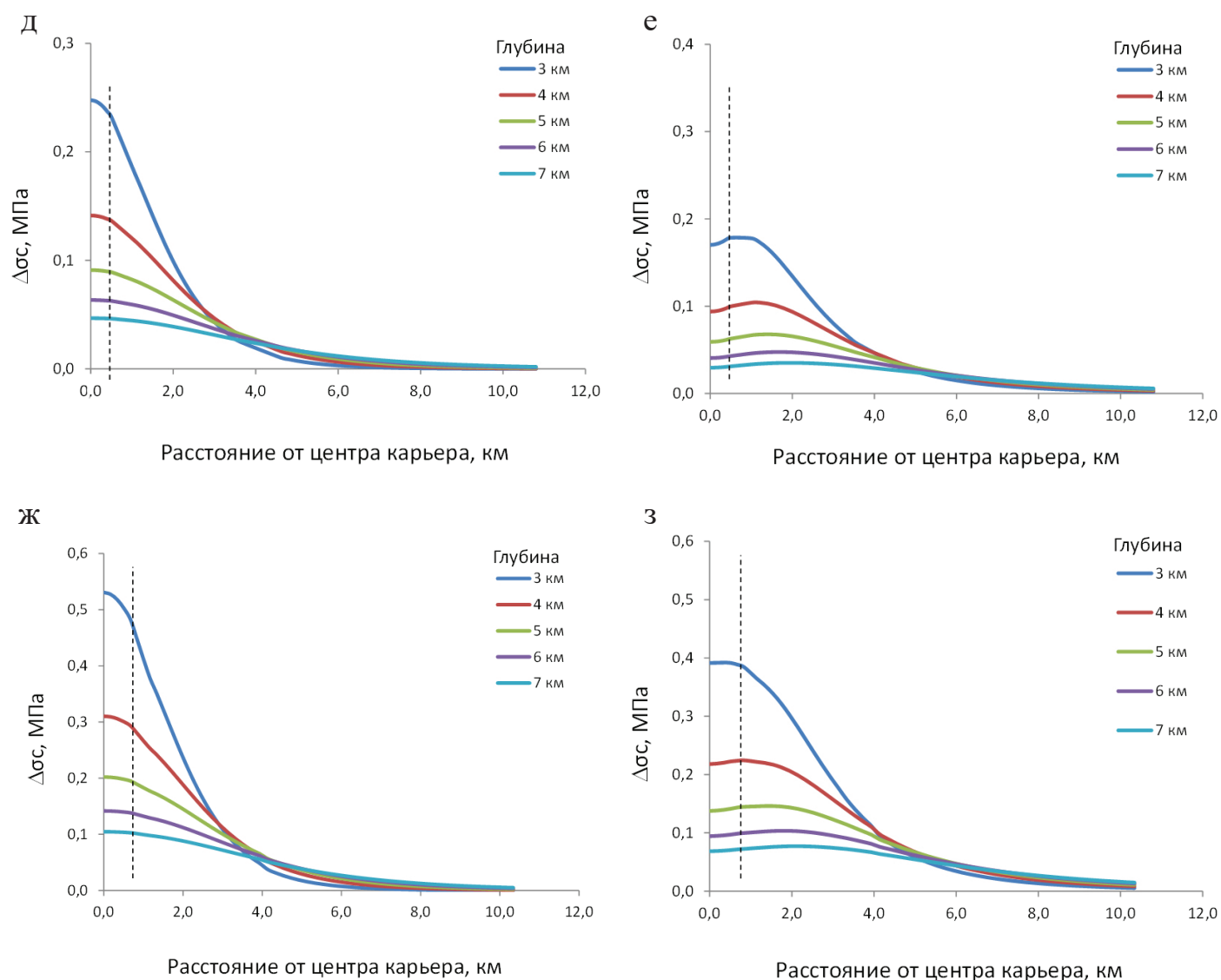


Рис. 6 Изменение кулоновского напряжения в окрестности выработки разрезов для разных углов падения плоскости модельного разлома: левый столбец – 30°, правый – 60°. Разрезы: Ургунский (а, б) – 1.8×0.9×0.16 км, Северный (в, г) – 1.5×0.9×0.2 км, Горловский (д, е) – 1.1×0.8×0.2 км, Восточный (ж, з) – 1.7×1.3×0.18 км.

Разным цветом показана расчетная глубина расположения площадки разлома, пунктир – граница карьера

Это означает, что образование карьеров, занимающих площадь около 2 км², потенциально может привести к инициированию значимых сейсмических событий с магнитудой до 3.5–4.5. Инициирование событий с большей магнитудой для карьеров таких параметров крайне маловероятно из-за недостаточно большой площади выемки. Моделирование выемки грунта на карьере большой площади (Бачатский) [Кочарян, Кишкина, 2018; Кочарян и др., 2019а, б] продемонстрировало изменения статического поля напряжений на весьма обширном участке в несколько километров: для малых углов падения разлома величины приращения кулоновского напряжения превосходят величину 1 МПа, т.е. превышают порог 0.1–0.3 МПа в несколько раз, почти под всей площадью карьера, протяженность которого составляет примерно 10 км. Это существенно превышает размер зоны зарождения даже достаточно крупного землетрясения $M \sim 6$ и может инициировать подвижку по уже подготовленному разлому.

В настоящее время в районе Кузбасса, например, действует более 20 угольных разрезов и ведется проектирование новых мощных угольных карьеров [Ольховатенко, 2014]. Исходя из наших оценок, существенное значение, которое будет определять потенциальную возможность возникновения сильного техногенного землетрясения, будет иметь не только и не столько глубина карьера, сколько

общая площадь выемки. Опасность может возникнуть в случае дальнейшего углубления больших по площади карьеров, сравнимых с Бачатским, например. При этом за пределами границы выработки величина $\Delta\sigma_c$ быстро снижается и достигает безопасного уровня ~ 0.1 МПа на расстояниях первых километров от границ карьера.

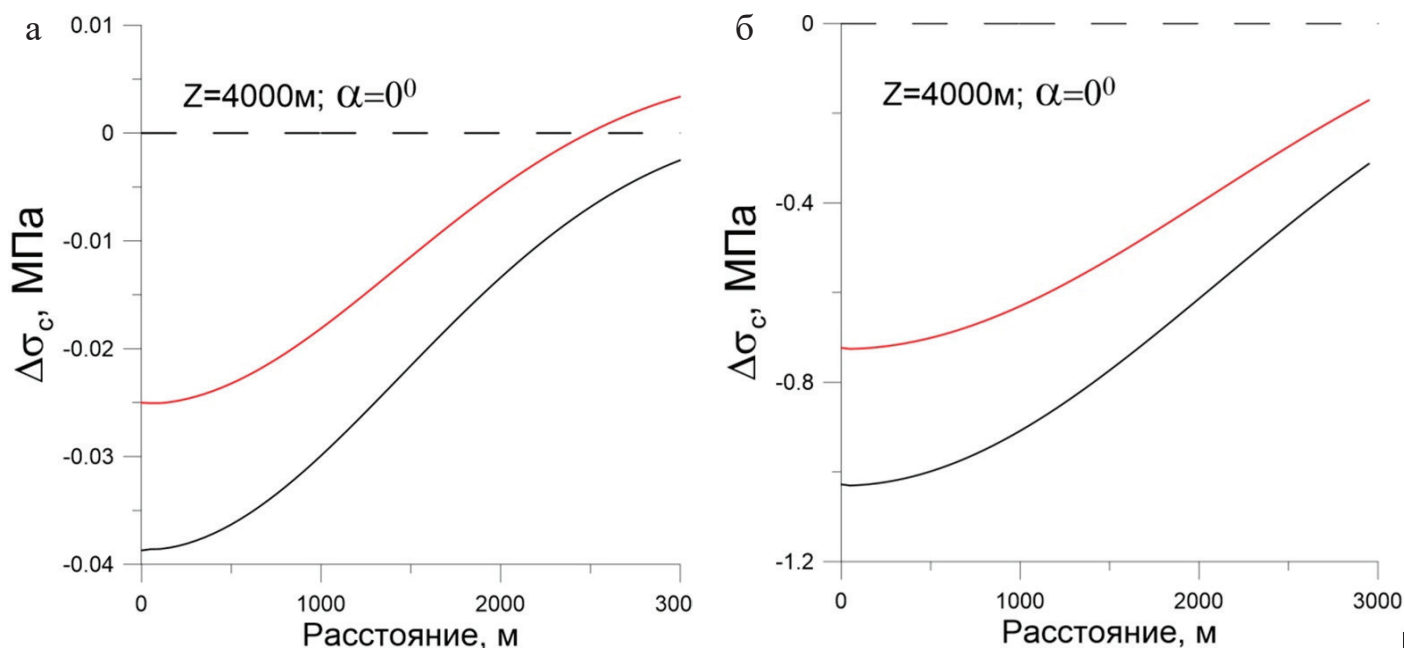
Более слабые сейсмические события с магнитудами $M < 3.5$ могут происходить, но их сейсмический эффект будет, очевидно, сравним с сейсмическим эффектом проводимых массовых взрывов.

Поверхностное складирование больших объемов породы при ведении горных работ

Техногенное воздействие на статическое поле напряжений может происходить не только под действием разгрузки массива из-за образования котлована, но и из-за появления дополнительной пригрузки, возникающей в ходе формирования отвалов горной породы (терриконов). Растущие разработки месторождений сопровождаются увеличением объемов породы, которая перемещается и складывается на поверхности. Например, в Кузбассе в 2018 году для обеспечения открытой добычи 165.8 млн тонн угля в отвальные горнотехнические сооружения было перемещено, соответственно, примерно в десять раз больше – около 1.8 млрд тонн пустой породы. Из сферы сельского и лесного хозяйства для этого пришлось вывести тысячи гектаров земли [Кутепов и др., 2019; Васильева, 2020].

Численные расчеты позволили оценить изменения напряженно-деформированного состояния массива в результате формирования отвалов горной породы. В двумерной осесимметричной постановке отвал моделировался в виде конуса высотой H и радиусом основания R . Использовалась шестислойная модель среды с возрастанием плотности пород от 1900 до 2700 кг/м³ (для глубин свыше 2000 метров). Расчеты были проведены для широкого диапазона значений угла падения сейсмогенного разлома. Подробное описание параметров расчетной модели представлено в [Кишкина и др., 2021]. Размеры отвалов выбирались в соответствии с существующими и проектируемыми высотами. Известно, что в районах длительной и интенсивной разработки угольных месторождений высоты отвалов в настоящий момент времени достигли 90–100 м; дальнейшее их наращивание приведет к формированию сверхвысоких отвальных объектов. На передовых предприятиях Кузбасского бассейна уже приняты в работу проекты 300-метровых отвалов и рассматриваются перспективы дальнейшего увеличения их высот до 500 и более метров [Васильева, 2020].

В примерах расчетов, результаты которых приведены на рис. 7, рассматривались две модели: конус высотой $H = 90$ м, диаметром от 1200 м (площадь основания 2.5 км²) и конус высотой $H = 300$ м,



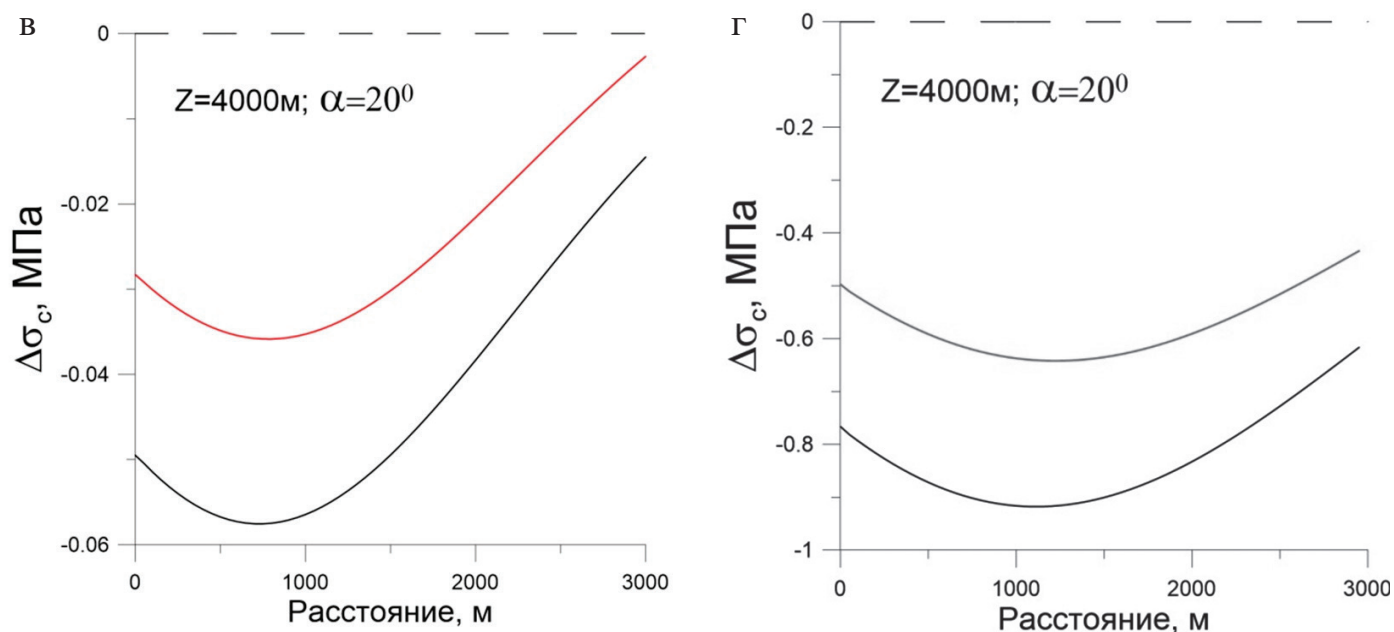


Рис. 7. Вариация кулоновского напряжения на глубине $Z = 4000$ м в окрестности отвала разной высоты. Цветом показаны результаты расчета для разных коэффициентов трения на площадке: $\text{tg} = 0.85$ (черный), $\text{tg} = 0.6$ (красный). а – высота отвала $H = 90$ м, угол падения разлома 0° ; б – высота отвала $H = 300$ м, угол падения разлома 0° ; в – высота отвала $H = 90$ м, угол падения разлома 20° ; г – высота отвала $H = 300$ м, угол падения разлома 20°

диаметром 6000 м (площадь основания 28 км²). Моделирование продемонстрировало, что поверхностное складирование породы не может инициировать сейсмическое событие на глубине в несколько километров даже для отвальных сооружений высотой 300 м. Более того, отрицательные значения вариации кулоновского напряжения свидетельствуют о том, что наличие отвала скорее тормозит процесс возможного инициирования динамической подвижки по разлому, сдерживает процесс потенциального развития неустойчивости. Исключение может составлять крутопадающий разлом, плоскость которого расположена непосредственно под отвалом. Однако и в этом случае величины вариаций Кулоновской функции малы и составляют всего несколько сотых МПа.

Подземная выемка больших объемов породы при ведении горных работ в шахтах

При разработках карьеров мы рассматривали потенциальную возможность влияния горных работ на большой участок разлома, который находится в окрестности карьера. Очевидно, что при разработках шахт столь масштабного влияния не происходит. Однако существует опасность непосредственного влияния антропогенного вмешательства на параметры горного массива. Например, подземные выработки могут изменить эффективную жесткость массива, что, в свою очередь, нарушит соотношение между жесткостью массива и жесткостью разлома.

Чтобы оценить возможность такого эффекта, был проведен ряд расчетов по моделированию процесса сдвигового деформирования скального блока с выработками. Подробное описание модели приведено в [Кочарян и др., 2018]. Зависимость относительного эффективного модуля сдвига участка массива от доли площади, занятой одним или несколькими рядами отработанных камер приведена на рис. 8. На рис. 8б показана схема рядов выработок, использованная при расчетах (приведен пример с тремя рядами выработок). Использовались параметры шахты им. Губкина (КМА, Коробковское месторождение).

Хорошо видно, что чем больше рядов разрушенных камер (разработанных горизонтов), тем ниже становится величина эффективного модуля сдвига. Если один ряд выработки снижает эффективный модуль сдвига G_{eff} примерно на 20%, то для трех рядов эффективный модуль массива уже снижается

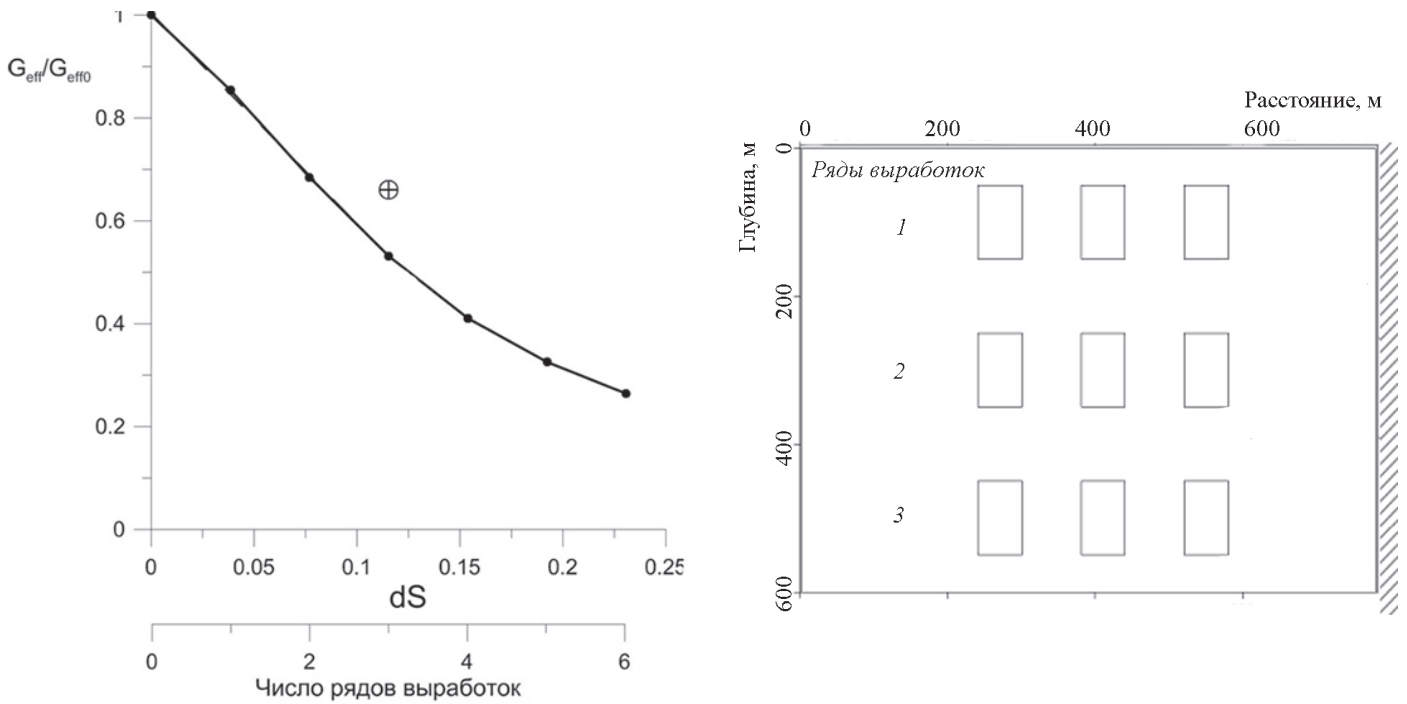


Рис. 8. Результаты расчетов по моделированию процесса сдвигового деформирования скального блока с выработками. Величина эффективного модуля сдвига G_{eff} нормирована на соответствующее значение для ненарушенного массива G_{eff} . Кружок – расчет варианта для выработок, заполненных разрушенной породой. Параллельно оси абсцисс (справа) показано число рядов выработок в соответствующем варианте расчета. Рассмотрен упругий блок (плотность $\rho = 2.7$ г/см³, модуль объемного сжатия $K = 28$ ГПа, модуль сдвига $G = 11.435$ ГПа, скорость продольных волн $a_0 = 4000$ м/с)

практически в два раза (рис. 8а). Такое снижение может критически нарушить его соотношение с жесткостью разлома

$$|k_s| = \left| \frac{\partial \tau}{\partial D} \right| \geq K = \eta \frac{G}{L}$$

и стать причиной инициирования динамической подвижки по разлому. В случае трех рядов камер эффективный модуль массива снижается уже не в два раза, а только на 34%. При этом расчеты демонстрируют (кружок на рис. 8а), что заполнение отработанных камер разрушенной породой заметно снижает вероятность возникновения неустойчивости по сравнению с массивом, содержащим незаполненные выработки.

Вариации флюидодинамического режима в зоне разлома

Огромное количество сейсмических событий, связанных с откачкой/закачкой флюида в массив (при добыче углеводородов, на тепловых месторождениях и пр.), говорит о том, что внедрение флюида является одной из немногих возможностей техногенного изменения фрикционного параметра разломной зоны в природных условиях.

В качестве основного физического механизма в таких случаях обычно рассматривают повышение внутривыворотного или пластового давления, что ведет к снижению эффективной кулоновской прочности разломов, т.е. к достижению локального или текущего предела прочности. Фактически, к выполнению критерия A . Однако есть целый ряд примеров, демонстрирующих, что на сейсмичность могут влиять совсем слабые вариации гидростатического давления около миллибар [Djadkov, 1997; Foulger et al., 2018; и др.]. В таких случаях объяснение эффекта Кулоновской моделью невозможно. Вероятно, процессы внедрения или откачки жидкости способны изменять непосредственно характеристики геоматериала.

Такой эффект наблюдался, например, в лабораторных экспериментах по исследованию процесса прерывистого скольжения гранитного блока по тонкому слою зернистого материала. [Кочарян, Остапчук, 2015; Кочарян и др., 2017] показали, что увеличение объемного содержания флюида всего на $\psi \approx 0.1\%$ может приводить к довольно резкому переходу от стабильного скольжения к прерывистому. При дальнейшем увеличении влажности режим стабилизируется и вплоть до $\psi \approx 10\%$ изменение характеристик режима деформирования почти не зависит от содержания флюида в заполнителе [Кочарян, Остапчук, 2015]. В других экспериментах, при инъекции в зону лабораторного разлома значительного количества флюида (~20% от объема трещины при пористости заполнителя около 35% жидкость распространялась примерно на 80% площади контакта), возможно изменение скорости подвижки, величины сброшенного напряжения и излученной энергии [Кочарян и др., 2017]. При этом изменение порового давления может быть совсем незначительным, по сравнению с уровнем нормального напряжения на разломе, т.е. режим скольжения менялся именно вследствие различия фрикционных свойств контакта. Авторы объясняют эти эффекты характером взаимодействия частиц материала, заполняющего лабораторный разлом, и отмечают существующие в природе коллоидные пленки, обволакивающие частицы заполнителя трещин, характеристики которых (химический состав глины) аналогичным образом могут влиять на режим деформирования разлома.

Накопление неупругих деформаций и локальные изменения порового давления за счет перетоков флюида способны изменить значение как текущей прочности контакта, так и его жесткости. Таким образом, воздействие сейсмических колебаний на напряженный разлом способно повлиять на выполнение всех трех сформулированных геомеханических критериев $A-C$, т.е. существует возможность, что техногенное изменение флюидодинамического режима может привести к иницированию динамической подвижки. В случае горных работ, однако, вероятность подобного сценария не столь высока, поскольку это изменение должно произойти на достаточно большой площади разлома.

Вопросы различия естественных и сильных техногенных землетрясений

Возвращаясь к публичной информационной повестке, нельзя не отметить, что любое заметное землетрясение, которое произошло в окрестности горнодобывающего предприятия, вызывает острые вопросы о его происхождении: вызвано ли оно горными работами или имеет природный характер. Ответы на такие вопросы, как правило, весьма нетривиальны. При этом дискриминация естественных и техногенных событий важна не только для общественного мнения, но и для разделения зоны ответственности государственных структур и страховых компаний, с одной стороны, и компаний, эксплуатирующих недра, с другой. Существенным является определение обоснованных ограничений на те или иные параметры воздействий, направленных на снижение опасности роста вероятности возникновения катастрофических землетрясений. Фактически, необходима выработка стратегии предотвращения возможного усиления сейсмической активности при ведении работ.

Обнаружение различий между крупными землетрясениями естественного и техногенного происхождения представляет собой проблему, сопоставимую по сложности с прогнозом землетрясений. Сегодня вся обширная работа по прогнозу землетрясений, ведущаяся на базе огромного фактического материала, сосредоточена, в основном, на эмпирическом анализе с использованием двух подходов. Либо на выявлении предвестников землетрясений – каких-либо аномальных, не характерных для наблюдаемого участка явлений или параметров, которые выявлены на основе прямых наблюдений и могут служить предупреждением о надвигающемся землетрясении (гидрогеологические сигналы, оценка приливных воздействий, излучение радона и т.д.). Либо на оценке характера сейсмичности или на выявлении какого-либо другого «длинного» геофизического тренда, или закономерности, которая может предшествовать сильному землетрясению.

Оценка характера сейсмичности предполагает наличие длинного временного ряда данных, которого, как правило, в асейсмичных районах нет. Что касается выявления предвестников, то

ситуация, обнажающая не сильно превышающую 50% – 60% надежность практически любого предвестника, весьма распространена. Особенно, когда речь идет не о катастрофических событиях, а о землетрясениях с магнитудой около 6. Самым ярким примером неудачного прогноза служат Паркфилдские землетрясения (Калифорния, США). Похожие землетрясения происходили там, в 1857, 1881, 1901, 1922, 1934 и 1966 годах, т.е. предполагали картину разрывов каждые 21.9 года со стандартным отклонением ± 3.1 года. Однако следующее событие произошло в 2004 г., когда его уже не ожидали. При этом оно не сопровождалось ни предваряющим крипом, ни форшоками [Langbein et al., 2005], как это случалось при предыдущих землетрясениях в этом районе.

Неопределенность прогноза, связанную со случайностью сейсмического процесса, пытаются оценить путем создания самообучающихся нейронных сетей, которые должны позволить собирать и анализировать все существующие прогностические признаки, делать выводы на основе сравнения многочисленных наборов данных [Bhatia et al., 2018]. Вероятно, чем обоснованнее будут материалы, на основе которых обучаются такие сети, тем надежнее окажется выполненный ими прогноз. К сожалению, пока это не так.

Помимо ненадежности опоры на прогностические признаки, необходимо учитывать, что сильные техногенные события могут произойти только на «подготовленном» участке, уже близком к метастабильному состоянию. При этом «подведение» участка разломной зоны к критическому состоянию есть процесс, детерминированный природной эволюцией соответствующего участка коры. Антропогенные воздействия могут послужить только триггером, т.е. слабым воздействием, которое приводит к моменту динамического срыва. Таким образом, сильное техногенное землетрясение имеет антропогенную причину возникновения (триггер) при естественном источнике энергии деформации. Это существенно осложняет дискриминацию подобных событий, поскольку оценка, например, наличие или отсутствие прогностических признаков или долгосрочных предвестников землетрясений, характерных (в некоторых случаях) для естественных событий, – даже, если не принимать во внимание ненадежность подобных оценок в принципе, – не может служить сколь-нибудь надежным критерием для различия природных и техногенных событий.

Механизм источника также не может помочь различать естественные и сильные техногенные землетрясения, поскольку для сильных техногенных событий характерен сдвиговый механизм очагов [Gibowicz, Kijko, 1994; Stek, 2007, Heesakkers et al., 2011; и др.], что присуще и природным очагам.

На сегодняшний день принято, что антропогенное воздействие в ходе разработки полезных ископаемых приводит к появлению большего детерминизма в геофизических системах, управляемых большим числом независимых переменных, и, как следствие, ведет к уменьшению корреляционной размерности, определяемой по данным о сейсмической активности. Этот признак можно пытаться использовать для дискриминации техногенных и естественных сейсмических событий в достаточно активных областях, где можно оперировать весьма представительной статистикой сейсмических событий. В частности считается, что для большинства случаев величина наклона графика повторяемости (параметра b) у индуцированных землетрясений выше, чем у природных [Gibowicz, Kijko, 1994; Яковлев и др., 2013]. Для техногенных землетрясений этот параметр, в основном, оценивался по слабым сейсмическим событиям в районах шахтных работ [Gibowicz, Kijko, 1994; Беседина и др., 2015]. Для оценки инициированных землетрясений такую оценку применить сложнее, поскольку это, как правило, отдельные события, подготовленные естественным ходом событий. При своем возникновении они, скорее всего, существенно не нарушают естественные параметры графика повторяемости конкретного района. Впрочем, на сегодняшний день это только умозрительные оценки, которые сложно подкрепить конкретными данными.

Нельзя не отметить важнейшую роль чувствительности имеющихся систем наблюдений. При расчете параметров графиков повторяемости заметную роль может играть недооценка магнитуд слабых землетрясений в случае недостаточно широкой частотной полосы аппаратуры или низкой чувствительности систем наблюдения, не позволяющих маломagnitude события уверенно зарегистрировать. В обоих случаях параметры графика повторяемости будут искажены за счет не

достоверного учета событий с малыми магнитудами. Подобная ситуация характерна для регистрации природных землетрясений. Тогда как системы мониторинга техногенных событий на шахтах или на месторождениях углеводородов, как правило, имеют высокую чувствительность и нацелены на уверенную регистрацию слабых сейсмических событий. За счет чего может возникать эффект увеличения наклона графика повторяемости для индуцированных землетрясений по сравнению с природными.

Еще один параметр, который до определенной степени может служить дискриминантом техногенных и природных событий – это отношение магнитуд сильнейшего афтершока и основного события. Считается, что в похожих условиях для индуцированных землетрясений оно несколько выше, чем для нормальных. Помимо этого высказываются предположения [Gupta, 2018], что для индуцированных землетрясений последовательность афтершоков продолжительнее, чем для обычных землетрясений.

Понятно, однако, подобные подходы пригодны лишь в том случае, когда индуцированные или природные события образуют достаточно длинные временные ряды. В том случае, когда необходимо идентифицировать генезис одного единственного события, необходимо искать иные методы дискриминации.

Одним из основных дискриминационных признаков может служить расположение источника сейсмического события.

В первую очередь в окрестности произошедшего землетрясения необходимо определить наличие объекта, который потенциально мог послужить триггером. Это может быть, например, карьер больших размеров: характерный размер участка воздействия должен быть заведомо больше размера зоны нуклеации землетрясения (считается, что размер зоны нуклеации L_c составляет примерно 10% от длины разрыва землетрясения). Как уже обсуждалось выше, для землетрясения с $M \sim 6$ зона нуклеации занимает около 1 километра, так что зона воздействия должна быть, по крайней мере, несколько километров, чтобы существовала вероятность совпадения инициации с подготовленным к срыву участком разлома.

Далее необходимо проанализировать связь сейсмического события с существующими сейсмогенными структурами. При этом не обязательно непосредственное совпадение гипоцентра землетрясения с местом проведения горных работ. Сегодня не вызывает сомнений, что для возникновения заметного сейсмического события необходимо сочетание многих факторов. Как уже отмечалось выше, в первую очередь необходимо наличие достаточно большого разлома, который мог бы быть источником сильного землетрясения: на сегодняшний день хорошо известно, что крупные техногенные землетрясения с $E_s > 10^9$ Дж ($M > 2.5$) чаще всего локализуются вблизи существующих в массиве разломных зон в некоторой окрестности ведущихся работ (и могут происходить с задержкой, подчас значительной, по отношению к производству работ). Так что сильное техногенное событие с $E_s > 10^9$ Дж ($M > 2.5$), спровоцированное горными работами, может произойти на удалении десятка километров от места и со значительной задержкой по времени от момента проведения работ [Gibowicz, Kijko, 1994; Snelling et al., 2013; и др.].

Необходимо, также, присутствие достаточно высоких напряжений в среде. Там, где энергия естественных тектонических напряжений недостаточно велика, энергия, которая сможет высвободиться инициированным землетрясением, также будет невелика. В таких случаях источники землетрясений располагаются в радиусе нескольких километров от непосредственного места ведения горных работ.

Еще одним существенным дискриминационным признаком может служить глубина и магнитуда произошедшего землетрясения. Как было отмечено выше, для крупных техногенных землетрясений характерен сдвиговый механизм очагов; причиной возникновения сейсмических колебаний является динамическая подвижка по уже существующему разлому. Причем, разлом может до этого длительное время не проявлять признаков активности. При этом даже самые сильные техногенные землетрясения происходят на небольших глубинах до 10–15 км. Максимальную магнитуду техногенного события, исходя из мировых данных о таких землетрясениях, следует ограничить значением $M_L = 6.5$.

Существуют альтернативные мнения. Например, [Foulger et al., 2018] приводит Веньчуанское землетрясение 2008, $M_w \sim 8$ (Китай; Wenchuan) в ряду событий техногенной природы. Однако, опираясь на существующие оценки размера зон нуклеации землетрясений разного масштаба, следует признать практическую невозможность воздействия на существенный объем среды, необходимый для провоцирования события такого масштаба. По крайней мере, на уровне развития современных промышленных технологий. Так что искусственное происхождение сильных землетрясений с $M_L > 6.5$ и глубиной больше 15 км пока остается крайне маловероятным.

Заключение

Закономерности распределения крупных техногенных событий во времени и пространстве пока не ясны, они носят региональный характер, не связанный непосредственно с ведущимися человеком работами, и, по всей видимости, реагируют на общее изменение напряжений в пределах района добычи. Такие события вызваны разрушениями при сдвиге по уже существующему разлому в окрестности нескольких километров от места горных работ. Большинство техногенных землетрясений не слишком велики: обычно их магнитуды не превышают величину $M = 4.0$. Однако уже зарегистрированы техногенные землетрясения с магнитудой $M \sim 6$ с источником на небольшой для землетрясения глубине $d \sim 4$ км, которые способны вызывать серьезные разрушения, в том числе на поверхности.

Моделирование процесса инициирования сильных техногенных землетрясений в районах добычи твердых полезных ископаемых продемонстрировало, что в ходе анализа потенциального развития техногенной сейсмичности важно обращать внимание на условия, необходимые для возникновения крупных техногенных событий, и сопоставлять их с реальной обстановкой в исследуемом районе [Кочарян и др., 2019а, б; Rubinstein et al., 2021]. Фактически, крупное техногенное землетрясение – это событие, возникшее при естественном источнике энергии деформации, но произошедшее «раньше срока» вследствие антропогенной причины. Так что для оценки потенциальной возможности такого события необходимо проанализировать сочетание потенциала существующей разломной зоны и масштаб антропогенного воздействия в её окрестности. Если в результате проводимых работ может выполняться ряд геомеханических критериев, способных спровоцировать динамическое событие, то даже небольшой величины изменения кулоновских напряжений на плоскости разлома, составляющей единицы процентов от уровня естественных напряжений, может оказаться достаточно для инициирования землетрясения. Принципиальным моментом является тот факт, что размер зоны, в которой выполняются геомеханические критерии инициирования, должен быть заметно больше критического размера зоны нуклеации для землетрясения предполагаемого размера.

В результате моделирования показано, что разветвленная сеть выработок в окрестности тектонического разлома может – при достижении определенного критического объема извлеченной породы – оказать заметное влияние на эффективную жесткость массива и, как следствие, на возможность возникновения динамических подвижек. Расчеты для случая 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. Продемонстрировано, что такое снижение эффективной сдвиговой жесткости массива может оказаться критическим с точки зрения возможности инициирования динамической подвижки по разлому. Однако практикуемая закладка камер разрушенной породой существенно снижает вероятность такого негативного сценария.

Расчеты, выполненные для больших карьеров, занимающих около 20 км² (как разрез «Бачатский» в Кузбассе [Кочарян, Кишкина, 2018; Кочарян и др., 2019а, б]), продемонстрировали, что извлечение и перемещение масс горной породы на такой площади может приблизить момент возникновения землетрясения с магнитудой $M \sim 6$, уже подготовленного естественной эволюцией горного массива.

Моделирование напряженного состояния массива, сформированного отвальными объектами на поверхности, не выявило возможности инициации крупных сейсмических событий.

Отметим, что на сегодняшний день в рутинной практике оценки сейсмической опасности на территории России техногенные события чаще всего просто исключаются из анализа. Хотя в российских нормативных документах при проведении инженерных изысканий и исследований района особо ответственных объектов (как площадки размещения АЭС, например) требуется рассматривать землетрясение любого генезиса как природного, так и техногенного [Федеральные нормы..., 2017]. При этом в мировой практике учет техногенных землетрясений при анализе сейсмической опасности уже существует. Так, Геологическая служба США в 2016 г. начала включать учет потенциала возникновения техногенных землетрясений в краткосрочные прогнозы сейсмической опасности [Mueller, 2017].

Выделенные типы и параметры антропогенных воздействий, способных быть триггером достаточно сильного техногенного землетрясения, помогут обоснованно определить ограничения на те или иные виды работ, что, в свою очередь сможет снизить вероятность возникновения катастрофических землетрясений. Фактически, результаты выполненного анализа могут лежать в основе выработки стратегии предотвращения возможного усиления сейсмической активности при ведении горных работ.

Кроме того, потенциал возникновения техногенных землетрясений необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности, особенно в районах расположения ответственных энергетических и инженерных объектов. Практика анализа подобных событий должна развиваться.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (темы 122032900172-5 и 122032900176-3).

Список литературы

- Адушкин В.В., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений // ФТПРПИ. 2017. № 1. С. 3–14.
- Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. и др. О влиянии сейсмических колебаний на развитие тектонических деформаций // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 1. С. 98–100.
- Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. – М. : Наука, 2007. – 579 с.
- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. – М. : ИДГ РАН, 2015. – 364 с.
- 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 (Кемерово, 17–19 ноября 2015 г.) ; КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 2015. – С. 36.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
- Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Влияние деформационных характеристик нарушений сплошности породного массива на эффективность излучения очагов индуцированной сейсмичности. Ч. I. Результаты натурных наблюдений // ФТПРПИ. 2015. № 4. С. 83–95.
- Васильева А.Д. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса: автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. С.-Петербург. 2020. – 22 с.
- Гончаров А.И., Куликов В.И. Геодинамические явления в Воркутинском угольном бассейне // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы Всероссийского семинар-совещания (Москва, 22–24 июня 2010 г.). – М. : ГЕОС, 2010. С. 269–277.
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18.06.2013 г.) // ФТПРПИ. 2014. № 2. С. 41–46.
- Змушко Т.Ю., Турунтаев С.Б., Куликов В.И. Связь шахтной сейсмичности с режимом горных работ на шахтах г. Воркуты // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. – М. : ГЕОС, 2011. Вып. 2. С. 75–88.

Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Будков А.М., Иванченко Г.Н., Локтев Д.Н. Воздействие горных работ разрезов Горловского бассейна на очаги землетрясений значительной магнитуды // ФТПРПИ. 2021. № 4. С. 11–23. DOI: 10.15372/FTPRPI20210402.

Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Изменения поля напряжений участка земной коры в результате крупного землетрясения, инициированного горными работами // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. – М. : ГЕОС, 2011. Вып. 13. С. 20–25. DOI: 10.26006/22228535_2021_1_21.

Короткин В.Г. Объемная задача для упруго-изотропного пространства // Сборник Гидроэнергопроекта. Л. : ГОНТИ, 1938. № 4. С. 52–85.

Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 5–22.

Кочарян Г.Г. Инициирование природных катастроф и техногенных аварий сейсмическими колебаниями малой амплитуды // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 6. С. 483–496.

Кочарян Г.Г. Масштабный эффект в сеймотектонике // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 353–385. DOI: 10.5800/GT2014520133.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Влияние вязкости тонких пленок на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // ДАН. 2015. Т. 463. № 3. С. 343–346.

Кочарян Г.Г. От землетрясений – к крипу: единство противоположностей // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2015. Вып. 7. С. 10–15.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. – М. : ГЕОС, 2016. – 424 с.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Мартынов В.С. Изменение режима деформирования разлома в результате инъекции флюида // ФТПРПИ. 2017. № 2. С. 20–28.

Кочарян Г.Г., Батухтин И.В. О моделировании процесса скольжения по разлому // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. – М. : ГЕОС, 2017. Вып. 9. С. 16–24.

Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б. Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // ФТПРПИ. 2018а. № 4. С. 34–44.

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. Об инициировании тектонических землетрясений горными работами. Выемка и перемещение породы при открытых горных работах // ФТПРПИ. 2018. № 5. С. 45–53.

Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б., Иванченко Г.Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года // Геодинамика и тектонофизика. 2019а. Т. 10. № 3. С. 731–759.

Кочарян Г.Г., Батухтин И.В., Будков А.М., Иванченко Г.Н., Кишкина С.Б., Павлов Д.В. Об инициировании динамических подвижек по разломам техногенным воздействием // Геофизические процессы и биосфера. 2019б. Т. 18. № 3. С. 104–116. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.3-7>

Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41. DOI: 10.31857/S0002333721040062.

Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 109–120. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120

Ляв А. Математическая теория упругости. – М. : ОНТИ, 1935.

Маловичко А.А., Маловичко Д.А. Оценка силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий // Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов / отв. ред. Н. Н. Мельников. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2010. Т. 2. Вып. 25. С. 66–92.

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. 6–14.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений землетрясениями // ДАН СССР. 1991. Т. 318. № 2. С. 320–324.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений подземными ядерными взрывами // ДАН СССР. 1991. Т. 319. № 2. С. 333–336.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Удаленные афтершоки землетрясений и подземных ядерных взрывов // ДАН. 1999. Т. 364. № 1. С. 110–113.

Ольховатенко В.Е. Инженерная геология угольных месторождений Кузнецкого бассейна. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 150 с.

Ружич В.В., Левина Е.А., Востриков В.И. К проблеме прогноза горных ударов в подземных выработках, пройденных на месторождениях полезных ископаемых // Изв. Сиб. отд-ния Секции наук о Земле РАЕН. 2009. № 2 (35). С. 113–125.

Сейсмичность при горных работах / под ред. Н. Н. Мельникова. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2002. – 318 с.
Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 4. С. 543–546.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. 2017. НП-064-17: утв. приказом Ростехнадзора от 30.11.2017 № 514.

Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И. К вопросу о классификации горных ударов // ФТПРПИ. 1986. № 5. С. 3–11.

Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса // ФТПРПИ. 2013. № 6. С. 20–34.

Bhatia A., Pasari S., Mehta A. Earthquake forecasting using artificial neural networks / The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5, 2018: ISPRS TC V Mid-term Symposium «Geospatial Technology – Pixel to People» (Dehradun, India, November, 20–23, 2018). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-823-2018>

Boucher G., Ryall A., Jones A.E. Earthquakes associated with underground nuclear explosions // J. Geophys. Res. 1969. No 74. P. 3808–3820.

Das S., Scholz C.H. Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1983. No 71. P. 1669–1675.

Deichmann N., Giardini D. Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland) // Seismological Research Letters. 2009. No 80(5). P. 784–798. DOI:10.1785/gssrl.80.5.784.

Djadkov P.G. Induced seismicity at the Lake Baikal: Principal role of load rate // Abstr. of the 29th General Assembly of the IASP of the Earth's Interior (Thessaloniki, Greece, August 18–28, 1997). 1997. P. 359.

Durrheim R.J. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa: 100 years of research. In: Extracting the Science: a century of mining research / J. Brune (editor) : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2010. P. 156–171. – ISBN 978-0-87335-322-9.

Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes // Science. 2013, Vol. 341, No. 6142. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1225942>

Ellsworth W.L., Beroza G.C. Seismic evidence for an earthquake nucleation phase // Science. 1995. Vol. 268. P. 851–855. DOI: 10.1126/science.268.5212.851.

Emiliani C., Harrison C.G.A., Swanson M. Underground nuclear explosions and the control of earthquakes // Science. 1969. Vol. 165. P. 1255–1256.

Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes // Earth-Science Reviews. 2018. Vol. 178. P. 438–514. DOI:10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

Freed A.M. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer // Annual Rev Earth and Planet Sci. 2005. Vol. 33. P. 335–367.

Gibowicz S.J., Kijko A. An introduction to mining seismology. San Diego. Academic Press. Inc., 1994. – 622 p.

Gomberg J. Stress/strain changes and triggered seismicity following the M_w 7.3 Landers, California, earthquake // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 751–764.

Gupta H.K. Review: Reservoir Triggered Seismicity (RTS) at Koyna, India, over the Past 50 Yrs // Bulletin of the Seismological Society of America. 2018. Vol. 108. P. 2907–2918. DOI:10.1785/0120180019.

Hardebeck J.L., Nazareth J.J., Hauksson E. The static stress change triggering model; constraints from two southern California aftershock sequences // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. P. 24427–24437.

Harris R.A. Introduction to a special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazards // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. P. 24347–24358.

Heesakkers V., Murphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth. Part I: structure and rupture of the Pretorius Fault, TauTona Mine, South Africa // Pure appl. Geophys. 2011. Vol. 168(12). P. 2395–2425.

Hill D.P., Reasenber P.A., Michael A. et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake // Science. 1993. Vol. 260. P. 1617–1623.

Hill D.P., Prejean S.G. Dynamic triggering. In: Geophysical treatise, earthquake seismology / Kanamori H (ed). 2007. Elsevier, Amsterdam.

- Howell R.A. UK public beliefs about fracking and effects of knowledge on beliefs and support: A problem for shale gas policy // *Energy Policy*. 2018. Vol. 113. P. 721–720. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.061>
- Ide S., Takeo M. Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 27.379–27.391. DOI: 10.1029/97JB02675.
- King G.C.P., Stein R.S., Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. America*. 1994. Vol. 84. P. 935–953.
- King G.C.P., Cocco M. Fault interactions by elastic stress changes: new clues from earthquake sequences // *Advances in Geophysics*. 2001. Vol. 44. P. 1–38.
- Langbein J., Borcherdt R., Dreger D., Fletcher J., Hardebeck J.L., Hellweg M., Johnston C.Ji.M., Murray J.R., Nadeau R., Rymer M.J., Treiman J.A. Preliminary report on the 28 September 2004, M 6.0 Parkfield, California earthquake // *Seismol. Res. Lett.* 2005. Vol. 76. P. 10–26.
- Lee K.-K., Ellsworth W.L., Giardini D., Townend J., Ge S., Shimamoto T., Langenbruch C. Managing injection-induced seismic risks // *Science*. 2019. No 364(6442). P. 730–732. DOI:10.1126/science.aax1878.
- Li L., Tan J., Wood D.A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., ... Chen H. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs // *Fuel*. 2019. Vol. 242. P. 195–210. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.026.
- Lin J., Stein R.S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109. B02303. DOI:10.1029/2003JB002607.
- Mueller C.S. Earthquake catalogs for the 2017 Central and Eastern U. S. short-term seismic hazard model: U. S. Geological Survey data release. 2017. <https://doi.org/10.5066/F7KP80B9>
- Papageorgiou A.S., Aki K. A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part II. Applications of the model // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1983. Vol. 73. P. 953–978.
- Parsons T., Velasco A.A. On near-source earthquake triggering // *J. Geophys. Res.* 2009. P. 114. B10307. DOI:10.1029/2008JB006277.
- Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // *Nature geosciences*. 2010. Vol. 3. P. 599–607. DOI: 10.1038/ngeo940.
- Richards P.G., Exstroem G. Earthquake activity associated with underground nuclear explosions. In: *Earthquakes induced by underground nuclear explosions // NATO ASI Series, 2. Environment*. Vol. 4. Springer. 1995. P. 21–34.
- Rubinstein J.L., Barbour A.J., Norbeck J.H. Forecasting induced earthquake hazard using a hydromechanical earthquake nucleation model // *Seismological Research Letters*. 2021. Vol. 92. P. 2206–2220. <https://doi.org/10.1785/0220200215>.
- Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature*. 1998. Vol. 391. P. 37–42.
- Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*: Cambridge. Cambridge University Press, 2002. – 496 p.
- Snelling P., Godin L., McKinnon S. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. Vol. 58.
- Stein R.S. The role of stress transfer in earthquake occurrence // *Nature*. 1999. Vol. 402. P. 605–609.
- Stec K. Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland // *Geophys. J. Int.* 2007. Vol. 168. P. 757–768.
- Summary Report of the Korean Government Commission on Relations between the 2017 Pohang Earthquake and EGS Project / The Geological Society of Korea; Korean Government Commission on the Cause of the Pohang Earthquake. 2019.
- Toda S., Stein R.S., Richards-Dinger K., Bozkurt S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. B05S16. DOI:10.1029/2004JB003415.
- Toda S., Stein R.S., Sevilgen V., Lin J. Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching – user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report. 2011–1060, – 63 p. <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84(4). P. 974–1002.

STRONG INDUCED EARTHQUAKES IN MINING AREAS

© 2023 S. B. Kishkina^{1,*}, A. M. Budkov¹, G. G. Kocharyan¹

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

**E-mail: KishkinaS@idg.ras.ru*

Strong induced earthquakes remain one of the most sensitive information issues for society, causing people's concern. In addition, the study of induced earthquakes provides chances to identify cause-and-effect relationships in the process of preparation and origin of the seismic event, to establish parameters that can be used to control the ongoing processes. The article summarizes the results of recent years working on the occurrence of strong induced earthquakes in the mining areas in the conditions for initiating dynamic slip-type events (type II) are described. Changes in Coulomb stresses on the fault plane are analyzed, as well as various factors that can cause such changes. It is shown that if the Coulomb stress changes reach several tenths of MPa on the fault plane of a significant size, significantly exceeding the area of the earthquake nucleation zone, then even a small value of one percent of the natural stress level may be sufficient to initiate seismogenerating movements along the stressed fault. Calculations performed for large quarries occupying about 20 km² (like the Bachatsky quarry in Kuzbass) have demonstrated that the extraction and movement of rock masses in such an area can bring closer the moment of occurrence of an earthquake with a magnitude of $M \sim 6$, already prepared by the natural evolution of the mountain massif. At the same time, the formation of large rock dumps during the development of such large quarries does not contribute to the initiation of large seismic events. An extensive network of underground workings in the vicinity of a tectonic fault has a noticeable effect on the effective rigidity of the massif and on the possibility of fault slip. However, the practice of laying chambers with destroyed rock significantly reduces the likelihood of such a negative scenario. The issue of discrimination of natural and man-made events is also considered, since it is important not only for public opinion, but also for the separation of the area of responsibility of state structures and insurance companies, on the one hand, and companies exploiting the subsoil, on the other. The identified types and parameters of anthropogenic impacts will help to reasonably determine restrictions on certain types of work, which, in turn, will reduce the likelihood of catastrophic earthquakes in mining areas. In addition, the potential of induced earthquakes should be taken into account when assessing seismic hazards, especially in areas where responsible energy and engineering facilities are located.

Keywords: induced earthquakes, initiated seismicity, trigger seismicity, earthquake nucleation zone, fault zone, Coulomb stress, mining, deep mining, quarry, dump structure.