

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.34, 622.83

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГОРНЫХ РАБОТ РАЗРЕЗОВ ГОРЛОВСКОГО БАССЕЙНА НА ОЧАГИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ МАГНИТУДЫ

С. Б. Кишкина, Г. Г. Кочарян, А. М. Будков,
Г. Н. Иванченко, Д. Н. Локтев

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

Проведены исследования с целью оценки воздействия горных работ, осуществляемых на угольных разрезах Горловского бассейна, на сейсмичность Искитимского района Новосибирской области. Проанализированы параметры сейсмических колебаний от массовых взрывов, выполнена оценка возможности инициирования сейсмических событий, а также оценка накопления деформаций при сейсмическом воздействии на напряженный разлом. В качестве основного потенциального триггера рассматривалось изменение параметров поля напряжений. Выполнены численные и аналитические расчеты разгрузки массива из-за образования котлована и дополнительной пригрузки из-за формирования отвалов породы как двух главных факторов техногенного воздействия на статическое поле напряжений. Для корректного выбора параметров расчетов предварительно проведен анализ геологического района угледобычи и основных физико-механических характеристик слагающих пород, выбраны основные механические параметры наиболее значимых структурных нарушений района.

Наведенная сейсмичность, горные работы, техногенные землетрясения, кулоновское напряжение, разломная зона

DOI: 10.15372/FTPRPI20210402

В последнее время регулярно обсуждается вопрос об инициировании довольно крупных землетрясений магнитудой $M > 4$ различными техногенными причинами. К ним относятся такие виды инженерной деятельности, как откачка из недр и закачка в скважины больших объемов жидкости при разработке месторождений углеводородов [1, 2], проведение крупных массовых взрывов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых [3], извлечение и перемещение больших объемов горной массы [4].

Известно несколько сотен землетрясений $M > 2.8$, которые связывают с добычей твердых полезных ископаемых на предприятиях Австралии, Китая, России, Южной Африки и других регионов [2]. Очаги некоторых из них расположены на значительной глубине — от 3 до 20 км, т. е. практически вне зоны интенсивного антропогенного воздействия. В базе техно-

генных землетрясений, собранной [2], фигурирует больше десяти подобных событий. В том числе четыре землетрясения в 1986, 1991, 1992 и 1996 гг. на глубинах 4.5–5.5 км в угольных шахтах Юты (США), землетрясение 1989 г. (глубина ~ 10 км), спровоцированное работами на угольном месторождении Ньюкасла (Австралия). Очаг Соликамского землетрясения 05.01.1995 г. (Верхнекамское месторождение калийных солей, Россия), по оценкам [5], приурочен к глубине ~ 8 км. Землетрясения с глубиной очага до 7 км наблюдались при разработке угольных шахт Таиджи в Китае [6]. В связи с этим регулярно возникают сомнения: имеют ли эти события только природное происхождение или необходимо рассматривать антропогенную причину их возникновения при естественном источнике энергии деформации.

Выполненные нами ранее расчеты для карьера “Бачатский” в Кузбассе показали, что извлечение и перемещение больших масс горной породы на площади свыше 20 км² может приблизить момент возникновения землетрясения магнитудой $M \sim 6$ [4, 7]. Наиболее вероятно, что независимо от антропогенной деятельности, энергия деформации, накопленная в массиве, рано или поздно реализуется в виде динамической подвижки.

Произошедшая в последние годы серия землетрясений $M > 3.7$ в Искитимском районе Новосибирской области также привлекает внимание. Некоторые авторы указывают именно добычу угля в качестве непосредственной причины этих сейсмических событий [8, 9].

Влияние сейсмических колебаний от массовых взрывов на напряженно-деформированное состояние разломных зон детально изучено в [10]. Показано, что максимальные амплитуды сейсмических колебаний на глубинах более 2 км, где наиболее вероятно расположение потенциальных очагов техногенно-тектонических землетрясений, при стандартных взрывах не превышают 2–3 мм/с, в большинстве случаев < 1 мм/с. На рис. 1 приведены рассчитанные по результатам [10] изолинии максимальных скоростей смещения грунта в окрестности карьерного взрыва массой 300 т при одновременно взрываемом заряде $q \sim 3.5$ т и времени замедления ~ 50 мс. По сейсмологическим данным [10], таких воздействий недостаточно для инициирования землетрясений магнитудами $M > 4$, хотя более мелкие индуцированные события могут происходить.

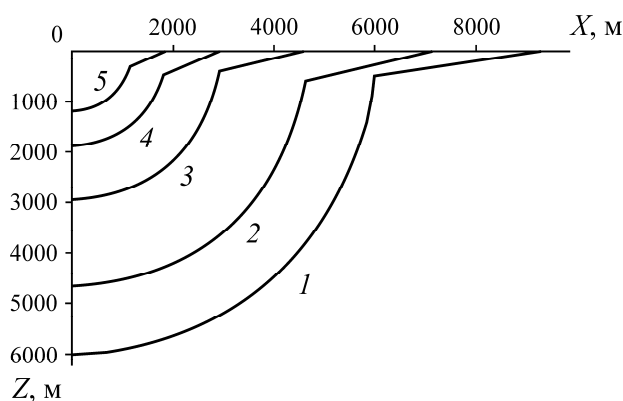


Рис. 1. Изолинии максимальных скоростей смещения грунта в окрестности массового взрыва с величиной одновременно взрываемого заряда $q = 3.5$ т: 1 — 0.17; 2 — 0.25; 3 — 0.5; 4 — 1.0; 5 — 2.0 мм/с

В настоящей статье приведены результаты численных и аналитических расчетов вариаций параметров кулоновских напряжений на вероятных плоскостях разломов, по которым произошли сейсмогенные подвижки в предположении, что образование котлована и отвалов породы — основные факторы техногенного воздействия на статическое поле напряжений.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ УЧАСТКА

Данные о сейсмичности восточной части Новосибирской области, включающей и Искитимский район, рассматривались по каталогам Международного сейсмологического центра (ISC), Алтае-Саянского филиала Единой геофизической службы (ЕГС) РАН и ЕГС РАН. Выбраны все события, эпицентры которых попали на площадку радиусом 100 км от условного центра карьера Восточный.

В этот район попадает эпицентр исторического Бердского землетрясения 1882 г. магнитудой $M \sim 5.7$, подробно описанного в каталоге [11], составленном для территории Российской империи и прилегающих регионов. В XX в. в рассматриваемом районе инструментально зарегистрировано только два события (с магнитудами 3.5 и 4.0 в 1996 г.). Период после 2007–2010 гг. характеризуется постепенным развитием сейсмических сетей и увеличивающимся количеством регистрируемых сейсмических событий. Основная масса событий зарегистрирована после 2007 г. В каталогах (рассматривался проверенный каталог ISC до августа 2018 г. и каталог Алтае-Саянского филиала за 2019 г.) содержатся 273 сейсмических события магнитудами $M \geq 2.5$, попавших в анализируемый район. Из них только 15 событий с ненулевой глубиной, около половины всех событий зарегистрированы в дневное время, т. е. относятся к той категории, которые в условиях недостаточно плотных сейсмических наблюдений считают записями сейсмических сигналов от взрывов [3]. Обычно магнитуа массового взрыва на крупном карьере составляет 2.8–3.8 и слабо зависит от суммарного заряда, поскольку, согласно используемым методикам, рассчитывается по результатам измерений амплитуды колебаний, определяемой массой одновременно подрываемого взрывчатого вещества в группе [12, 13]. Для Новосибирской области локальная магнитуа взрывов ML не превышает 3.5 [14].

В контексте данной работы наибольший интерес представляют сильные землетрясения, связанные с подвижками по разломам. Согласно данным каталогов, только четыре события в интересующем районе имеют магнитуды $M \geq 4$. Источники двух событий магнитудами 4.0 и 4.2 (08.05.1996 г. и 14.07.2016 г.) определены на глубине 35 км, еще два — самые большие инструментально зарегистрированные события в рассматриваемом районе: Кольванское землетрясение 09.01.2019 г. ($M=4.4$, $d=5$ км) и событие 29.10.2019 г. ($M=4.3$, $d=10$ км) по ЕГС РАН.

Активная добыча на участках Горловского месторождения началась в 70-х годах XX в. За это время извлечено 197 565 тыс. т угля и перемещено более 484 796 т массы вскрышной породы. Темпы добычи и объемы перемещенной породы быстро росли с 1979 по 1983 г. и резко упали после 1993 г., вернув тенденцию к постепенному росту только в 2000 г. В настоящее время интенсивно проводятся взрывные работы, масса взрывчатых веществ при одном взрыве составляет сотни тонн.

Сравнение изменения объема добычи и перемещения пород и крупных землетрясений, произошедших за это время в исследуемом районе, показало, что крупные события происходили и могут происходить при разном уровне техногенного воздействия. Самое крупное землетрясение $M \sim 5.7$ (“Бердское” 1882 г.) произошло до сколь-нибудь значимого антропогенного воздействия, а событие 1996 г. — на фоне заметного спада темпов и объема добычи.

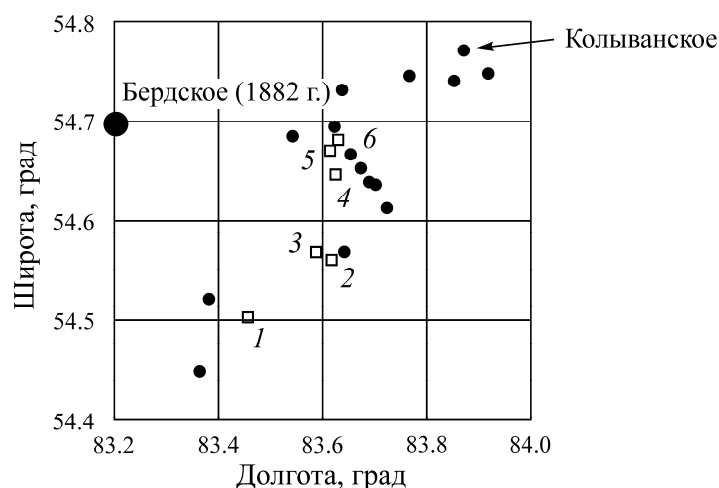


Рис. 2. Фрагмент схемы пространственного распределения сейсмических событий магнитудами $M > 3.5$ в исследуемом районе. Квадраты и цифры — местоположение карьеров (производственных участков), в скобках приведена занимаемая ими площадь (ориентировочно): 1 — Ургунский (1.7 км²); 2 — Выдрихинский (0.1); 3 — Горловский (0.1); 4 — Восточный (2.3); 5 — Крутихинский (2.0); 6 — Северный (2.5 км²)

Несомненно, при недостаточном качестве сейсмической регистрации и, соответственно, при невозможности с хорошей точностью оценить параметры источника и определить его природу происходит завышение или занижение количества землетрясений $M = 3.5 - 4.0$ при любых критериях искусственного выбора событий. В частности, при выборе только ночных событий наверняка исключается из анализа ряд землетрясений. Так, для каталогов Искитимского района несколько событий с ненулевой глубиной (т. е. считающихся не записями взрывов, а заведомо землетрясениями) произошли в дневное время. Отсевание событий по глубине также не приводит к однозначному успеху: оценка глубины в условиях недостаточно плотных сейсмических измерений часто недостоверна даже для крупных событий. Например, два события 2019 г. магнитудой 4.4 (Колыванское землетрясение, 09.01.2019 г.) и 4.3 (29.10.2019 г.) имеют в каталоге ISC неопределенную глубину 0 км, тогда как служба ЕГС РАН, на основании данных сетей Алтае-Саянского филиала, определяет их глубину на уровне 5 и 10 км.

Такие значительные неопределенности в оценке параметров источников (магнитуд, координат, глубины) и природы событий, а также факты возникновения крупных событий при разном уровне техногенного воздействия не позволяют говорить об однозначной связи роста техногенной нагрузки на верхнюю часть коры и процесса инициирования крупных землетрясений на основании простого сравнения количественных данных о сейсмических событиях и уровне добычи. Необходимо рассматривать непосредственное влияние горных работ на очаговую область каждого события.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ УЧАСТКА

Сведения о геологическом строении участка изложены на основе фондовых материалов и государственных геологических карт различного масштаба.

Рассматриваемый район угледобычи расположен в южном складчатом обрамлении Западно-Сибирской плиты в междуречье рек Оби и Берди в пределах Горловского прогиба (грабен-синклинали).

Горловская тектоническая зона, где локализованы крупные угольные разрезы, представляет собой глубокую и очень узкую, шириной 12–15 км, грабен-синклиналь, расположенную между северо-западной окраиной Салаира и Колывань-Томской складчатой зоной, вытянутую в северо-восточном направлении на 200 км. Горловская грабен-синклиналь сопряжена с соседними региональными геологическими структурами по крупным разломам. Тектоническое строение прогиба своеобразное. Узкие напряженные складки вытянуты в северо-восточном направлении и часто опрокинуты к юго-востоку. Наблюдается чередование интенсивно сжатых антиклиналей и синклиналей, осложненных более мелкой складчатостью второго порядка и разрывными нарушениями. В пределах Горловской тектонической зоны широко распространены разрывные нарушения, выделяется несколько систем дизъюнктивных дислокаций.

Наиболее древняя система глубинных разрывных нарушений, развитых на площади работ, представляет собой долгоживущие разрывные нарушения первоначально сбросового характера, отделяющие Колывань-Томскую структурную зону и Северо-Западный Салаир от Горловской грабен-синклинали. Амплитуда разрывных нарушений по сместителю варьирует в широких пределах: от нескольких сотен метров до 3–5 км.

Вторая система разрывных нарушений имеет северо-западную ориентировку и прослеживается по геофизическим данным, а также по результатам дешифрирования в пределах Колывань-Томской структурной зоны и Горловского прогиба. Горизонтальная амплитуда достигает первых километров, вертикальная составляет несколько сотен метров.

Поверхности сместителей третьей системы разрывных нарушений имеют северо-западное падение, амплитуды достигают от нескольких сотен метров до 3 км.

Достоверные данные бурения до глубины 5 км отсутствуют. Но с высокой долей вероятности, опираясь на геологические и геофизические материалы, можно считать, что бортовой разлом Горловской грабен-синклинали уходит на эти глубины, возможно выполаживаясь и являясь границей породных комплексов с резко отличными магнитными свойствами и различной средней плотностью.

Томско-Каменский надвиг — крупный региональный разлом, ограничивающий Горловский прогиб с востока и наиболее близко подходящий к угольным разрезам (первые километры). Он представлен серией дизъюнктивов в полосе шириной до 4 км. Наблюдения за плоскостями скольжения свидетельствуют о субвертикальном падении сместителя с поверхности. Предполагается листрический характер надвига, его выполаживание с глубиной в северо-западном направлении. Надвиговые дислокации по Томско-Каменскому разлому осложнены, по-видимому, более поздними крупноамплитудными левосдвиговыми, вероятно неотектоническими перемещениями, связанными с формированием Салаирской взбросо-надвиговой системы. Кинематические характеристики Томско-Каменского разлома неоднозначны и требуют уточнения с помощью специализированных структурно-тектонических исследований.

На рис. 3 показаны активные разломы по [15]. Район угледобычи находится в зоне сочленения трех активных разломных зон — сдвига и надвигов, причем по данным [15] активны преимущественно секущие по отношению к Горловской зоне структуры. Наиболее потенциально активные региональные разломы расположены в стороне от разрезов Северный, Крутихинский и Восточный, пересекая участки карьеров Выдрихинский, Горловский и Ургунский.

Местные нарушения, связанные с региональными надвигами и складчатостью, распространены в бассейне повсеместно. Они относятся к типам согласных взбросов и надвигов с амплитудой от единиц до сотен метров. Отметим, что пространственная увязка дизъюнктивных нарушений и складчатых структур в условиях сложного геологического строения затруднена и носит многовариантный характер.

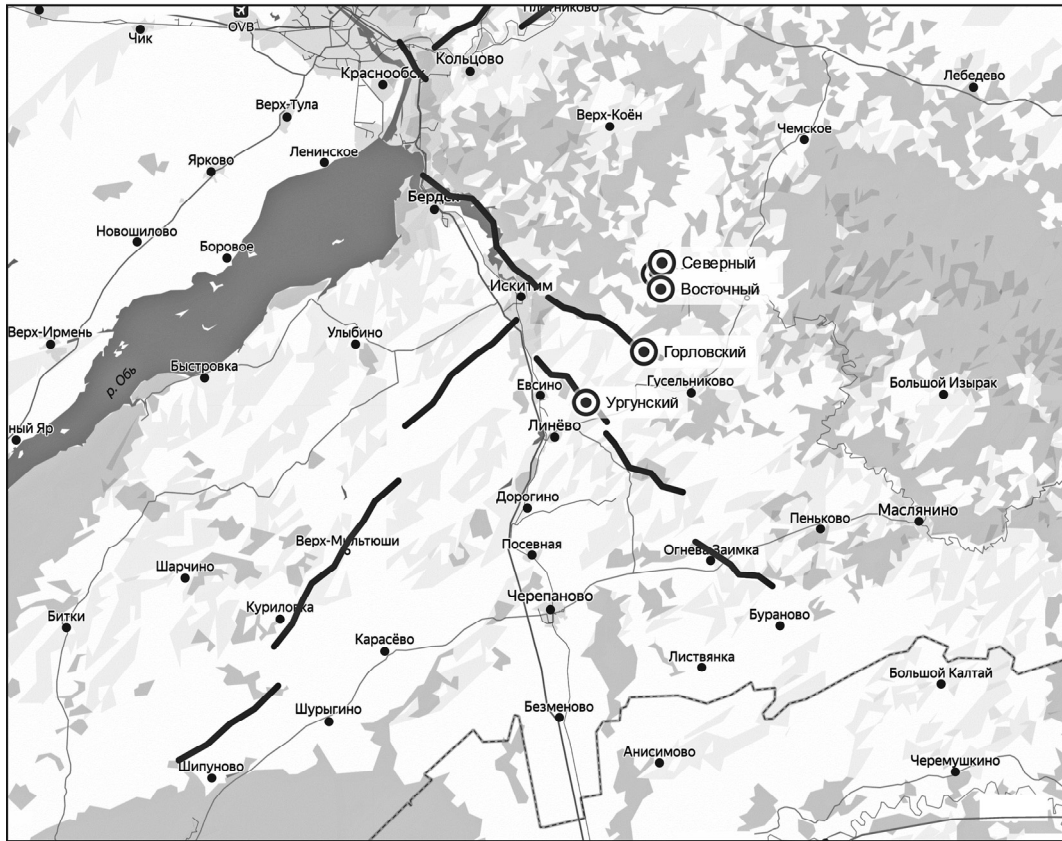


Рис. 3. Активные разломы района Горловского прогиба (по [15]). Круглыми значками показано местоположение карьеров (производственных участков) Горловского месторождения

Нами выделены четыре группы нарушений, возникающих в массиве, и на их основе построен схематический разрез Горловской угленосной зоны (рис. 4). Схема носит гипотетический характер, так как имеющихся данных для более точных построений недостаточно.

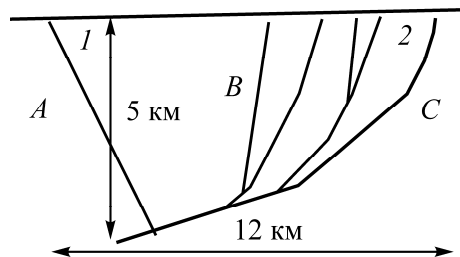


Рис. 4. Схематический разрез Горловской угленосной грабен-синклинали: *A* — Колывань-Томская зона; *B* — Горловская зона; *C* — Западно-Салаирская зона; *1* — Восточный бортовой разлом Горловской зоны; *2* — Томско-Каменский надвиг, ограничивающий Горловский прогиб с востока

На основании существующих геологических карт и разрезов исследуемой территории, а также по аналогии с более изученными геологическими разрезами угледобывающих регионов можно оценить глубинное строение Горловской грабен-синклинали. Она имеет возраст и палеозойские геодинамические условия формирования, близкие к угленосным структурам Кузбасса. Кинематика разломов, ограничивающих грабен-синклинали, на протяжении геологиче-

ской истории неоднократно менялась. Бортовые разломы Горловской грабен-синклинали, в том числе Восточный, в момент образования в условиях растяжения были сбросами, возможно литрическими. В последние 100 млн лет и, особенно, на неотектоническом этапе, данный разлом работал как взброс или взбросо-сдвиг. Учитывая первичную природу этого дизъюнктива и накопленную суммарную амплитуду с момента образования, разлом можно классифицировать как обратный сброс, т. е. он несколько круче, чем разломы системы чешуйчатых надвигов в зоне, например, Бачатского землетрясения, изначально формирующихся при сжатии. В приповерхностной части наклон сместителя по наблюдениям в карьерах крутой ($60-80^\circ$). Мы предполагаем, что на глубине первых двух километров разлом выполаживается до $30-40^\circ$, а на глубине 4–5 км можно ожидать выполаживание до 20° . Однако прямых доказательств (глубокое бурение и/или детальное сейсмопрофилирование, как, например, в Кузбассе) не имеется.

С другой стороны, установленный сейсмологами механизм землетрясения 09.01.2019 г. с $M_L=4.3$ (взброс) [16] предполагает довольно крутой угол подвижки по плоскости разлома. Таким образом, следует констатировать, что достоверно установить углы падения разломов на предполагаемой глубине расположения очагов крупных событий (~ 4 км) невозможно. В этой связи при проведении расчетов целесообразно варьировать угол падения сейсмогенного разлома в широких пределах.

ВЛИЯНИЕ ВЫЕМКИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА

Эпицентры крупных сейсмических событий, происходящих в окрестности карьеров, лежат на глубине нескольких километров. Это означает, что выемка и перемещение породы не влияют на свойства разлома и свойства вмещающего массива в окрестности очага землетрясения. Так что в качестве основного триггера следует рассматривать изменение параметров поля напряжений [17].

Техногенное воздействие на статическое поле напряжений происходит под действием двух факторов: разгрузки массива из-за образования котлована и появления дополнительной пригрузки из-за отвалов породы.

Абсолютные значения вариаций естественного поля на глубине несколько километров невелики по сравнению с литостатическими напряжениями. В связи с этим необходимо оценить параметры вариаций в зависимости от глубины, размеров выемки и угла падения разлома.

Для того чтобы оценить вариации поля напряжений в результате выемки породы в карьере, используем решение задачи Лява, 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, то выемку породы можно с некоторым приближением отождествлять со снятием нагрузки $\zeta_z = \rho gh$, равномерно распределенной по площади выемки. Более детально постановка задачи и соответствующие соотношения приведены в [7].

Разработка Колыванского месторождения Горловского угольного бассейна в Искитимском районе ведется открытым способом на трех разрезах, включающих шесть производственных участков (см. рис. 2, 3). На рис. 5 приведено изменение вертикальной компоненты напряжений $\Delta\sigma_z$ от глубины для выемки с параметрами, близкими к соответствующим значениям для участка Восточный. Плотность породы принята $\rho = 2.6 \cdot 10^3$ кг/м³. Можно видеть, что на глубине несколько километров изменение компоненты $\Delta\sigma_z$ в результате выемки породы составляет менее 1 % от литостатического напряжения.

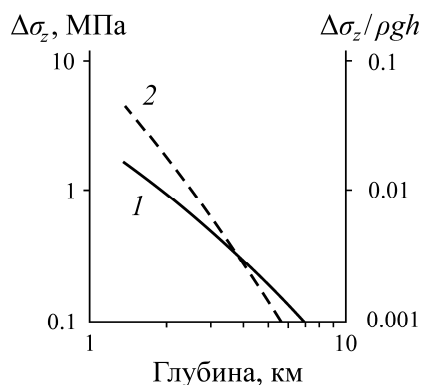


Рис. 5. Изменение вертикальной компоненты напряжений под центром карьера: 1 — абсолютное значение; 2 — нормированное на соответствующее значение литостатических напряжений. Глубина выемки 180 м, размеры в плане 1.7×1.3 км

Насколько такое изменение напряженного состояния может быть критичным по отношению к инициированию крупных техногенных землетрясений, удобно рассмотреть с применением известного подхода, используемого в сейсмологии при анализе процесса инициирования афтершоковых последовательностей крупных землетрясений [18].

Напомним, что, согласно этому подходу, изменение поля напряжений как бы “подталкивает” соседний разлом несколько ближе к порогу кулоновского разрушения. Этот процесс часто описывают с помощью оценки вариации, так называемой функции Кулона, на ориентированной определенным образом площадке:

$$\sigma_c = \tau - \mu(\sigma_n - p), \quad (1)$$

где σ_n , 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 напряжения на сейсмогенной глубине достаточно сложно, можно оценить изменение напряжений и с помощью данной оценки рассчитать изменение сдвиговых и нормальных напряжений на близлежащих нарушениях сплошности. Таким образом, не зная абсолютных напряжений, можно вычислить изменение функции Кулона, используя инкрементальное уравнение:

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

из которого можно понять, был ли разлом подведен ближе к критическому состоянию ($\Delta\sigma_c > 0$), либо отодвинут в более стабильное ($\Delta\sigma_c < 0$). Заметим, что для этих расчетов не требуется сведений о напряженно-деформированном состоянии 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 [18, 19]. Примеры ее применения можно найти в [4, 19]. Ключевым является то обстоятельство, что изменения напряжений, приводящие к инициированию деформационных процессов, весьма малы. Сопоставление результатов расчетов изменений статического поля напряжений с распространенностью афтершоков показывает, что большинство их располагается в зоне изменения кулоновских напряжений $\Delta\sigma_c$

на 0.1 – 0.3 МПа, в то время как снижение $\Delta\sigma_c$ на ту же величину сдерживает рост сейсмичности. Такие малые величины, являясь незначительной частью общего сброса напряжений при землетрясении, указывают на то, что квазистатические изменения напряжений не являются причиной землетрясения, а только приближают или отдаляют момент события.

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. Как уже отмечалось, достоверно установить углы падения разломов на предполагаемой глубине расположения очагов крупных событий (~ 4 км) не представляется возможным, поэтому в расчетах угол падения сейсмогенного разлома целесообразно варьировать в широких пределах.

По описанной методике выполнены расчеты вариации функции Кулона (2) в окрестности выработок в форме параллелепипеда 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. Полупространство в расчетах предполагалось однородным (плотность $\rho = 2.8 \cdot 10^3$ кг/м³), коэффициент трения на площадке $\mu = 0.8$.

На рис. 6 приведены результаты расчетов для разреза Восточный, величина положительной вариации функции Кулона под центральной частью карьера которого оказалась наибольшей. На площадке с углом падения 30° вариация составляет $\Delta\sigma_c = 0.52$ МПа на глубине 3 км и $\Delta\sigma_c = 0.31$ МПа на глубине 4 км. За пределами границы выработки $\Delta\sigma_c$ быстро снижается и достигает безопасного уровня (0.1 МПа) на расстоянии 2.0 – 2.5 км от границы карьера. Аналогично ведет себя поле напряжений в окрестности остальных разрезов. Безопасный уровень вариации напряжений на плоскостях разломов, расположенных на сейсмогенной глубине, достигается для разных разрезов на расстояниях от 1.0 до 2.5 км от границы карьеров.

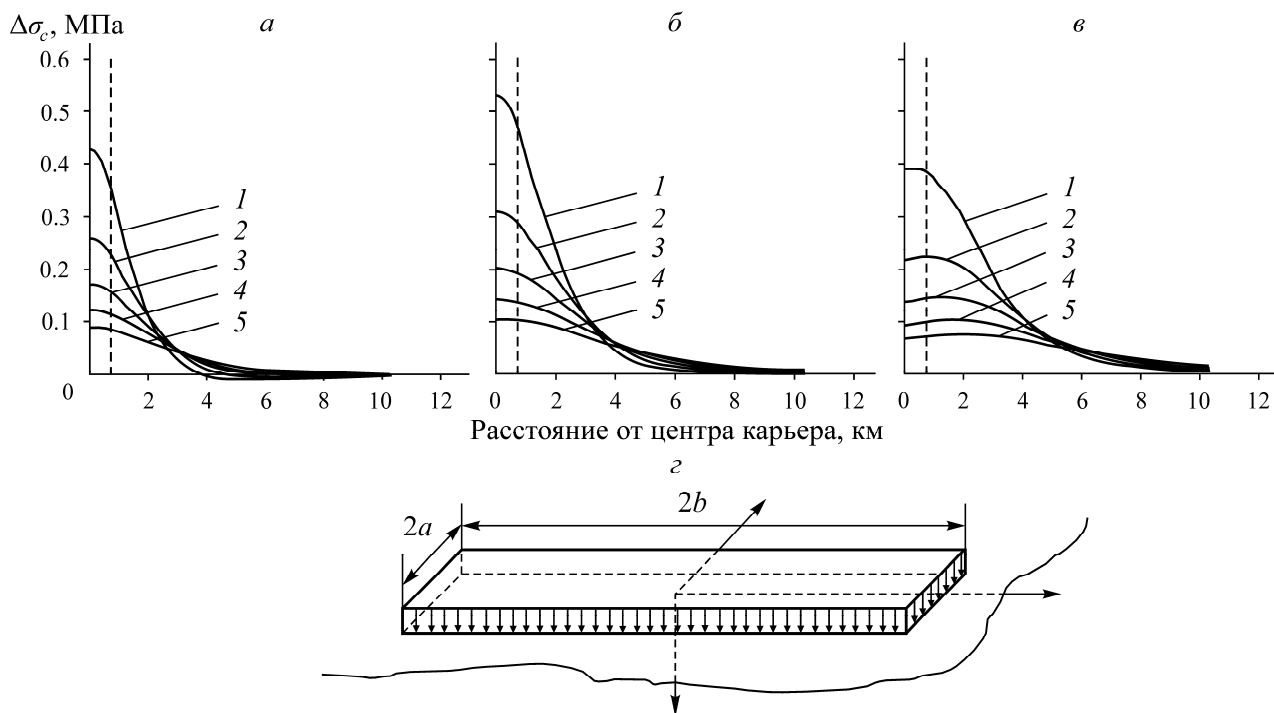


Рис. 6. Вариации кулоновского напряжения в окрестности выработки разреза Восточный глубиной 180 м и размером в плане 1.7×1.3 км при угле падения плоскости площадки 10° (а), 30° (б) и 60° (в); z — расчетная схема задачи Лява. Пунктир — граница карьера. Глубина расположения площадки 1–3 (1), 2–4 (2), 3–5 (3), 4–6 (4), 5–7 км (5)

ТАБЛИЦА 1. Параметры расчетной модели

Глубина, м	Скорость P -волн, м/с	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона	Порода
-100–0	700	1900	0.420	Отвал
0–50	1000	1900	0.400	Четвертичные отложения
50–150	1200	2000	0.390	Алевролиты, аргиллиты, песчаники, глинистые сланцы
150–250	1300	2100	0.380	
250–350	1400	2250	0.375	
350–2000	3000	2400	0.350	Известняки, сланцы
> 2000	5000	2700	0.310	Гранит

Второй источник вариаций кулоновских напряжений на плоскости скольжения — складирование породы на берегах разреза. Для его оценки выполнялись численные расчеты в двумерной постановке (осевая симметрия), отвал моделировался в виде конуса высотой H и радиусом основания R . При моделировании использовалась шестислойная модель среды. Свойства слоев приведены в табл. 1, в соответствии с типичным для данной местности геологическим разрезом.

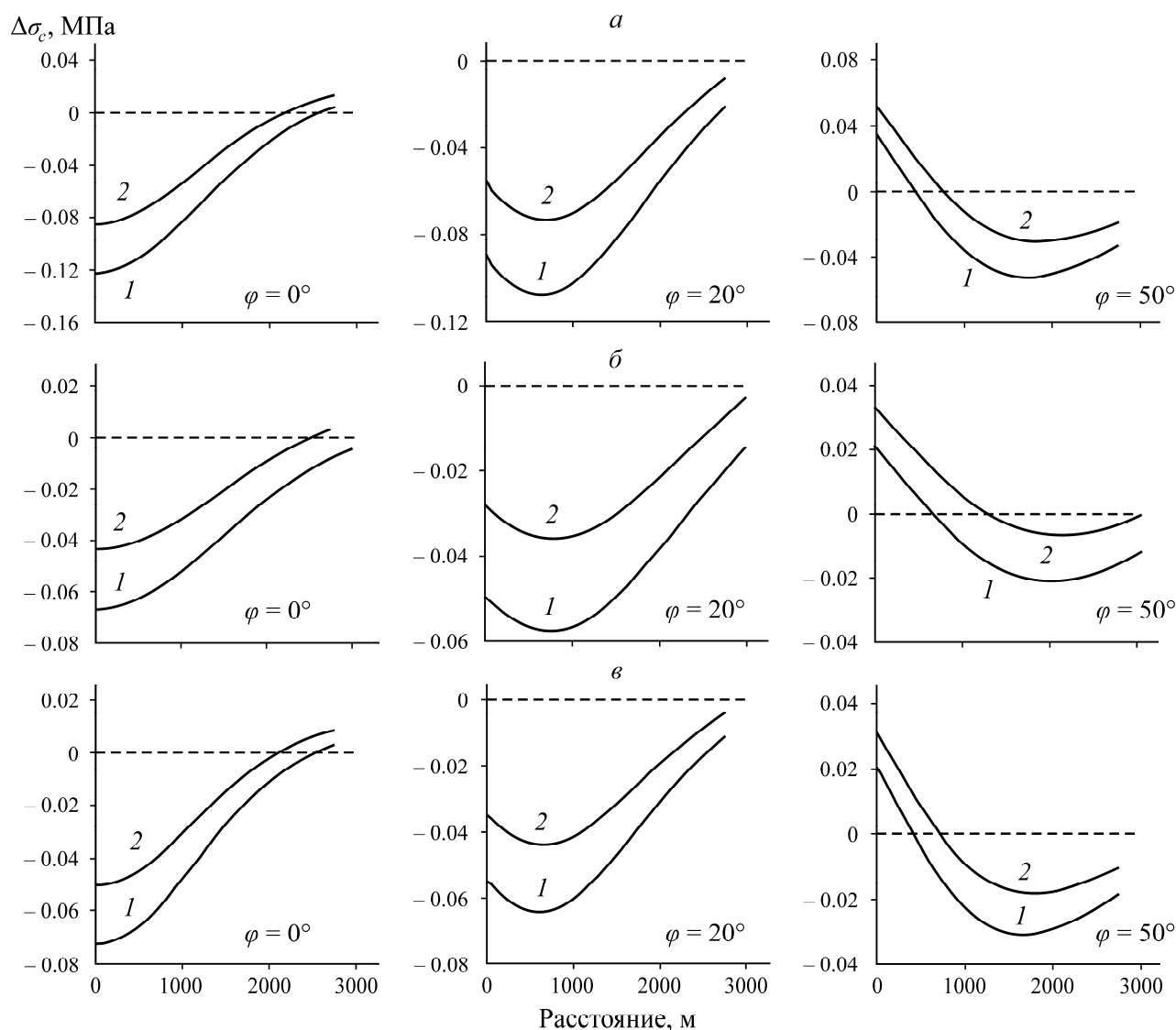


Рис. 7. Вариации кулоновского напряжения в окрестности отвала: a — $R=1200$ м, $H=90$ м, $Z=3000$ м; $б$ — $R=1200$ м, $H=90$ м, $Z=4000$ м; $в$ — $R=900$ м, $H=90$ м, $Z=3000$ м; φ — угол падения плоскости площадки; коэффициент трения на площадке 0.85 (1) и 0.60 (2)

В расчетах рассматривались две модели: конус высотой $H=90$ м, диаметром 1800 м (площадь основания 2.54 км^2) и конус высотой $H=90$ м, диаметром 2400 м (площадь 4.52 км^2). Такие значения типичны для разрезом, расположенных в Искитимском районе. Расчеты проводились с помощью двумерного программного комплекса, разработанного на основе лагранжева численного метода “Тензор” [20] для двух значений коэффициента трения на разломе 0.85 и 0.60 (рис. 7). Видно, что в большинстве случаев изменение кулоновской функции имеет отрицательный знак, т. е. наличие отвала не только не приводит к стимулированию динамической подвижки по разлому, но и сдерживает этот процесс. Исключение составляют крутопадающие площадки, расположенные непосредственно под отвалом. Однако и в этом случае вариации кулоновской функции малы и составляют всего несколько сотых мегапаскалей.

Таким образом, наличие отвалов существующих размеров не приводит к негативным эффектам в плане инициирования крупных землетрясений. Более того, пригрузка свободной поверхности может несколько снизить возможные негативные эффекты от наличия рядом глубоких карьеров.

ВЫВОДЫ

Выполнены количественные оценки влияния массовых взрывов, а также выемки и перемещения горной массы на инициирование значимых землетрясений.

Анализ параметров сейсмических колебаний от массовых взрывов показывает, что взрывное воздействие на области разломов, расположенные на глубине в несколько километров, даже в непосредственной близости от разрезов оказывается довольно слабым. В силу этого инициирование землетрясения значительной магнитуды как непосредственно воздействием сейсмических колебаний от взрыва, так и в силу накопления деформаций при многократных воздействиях, скорее всего, невозможно.

Проведенные численные и аналитические расчеты показали, что наличие отвалов существующих размеров в большинстве случаев не приводит к стимулированию динамической подвижки по разлому. Напротив, пригрузка свободной поверхности может несколько снизить возможные негативные эффекты от наличия рядом глубоких карьеров. Исключение — крутопадающие площадки, расположенные непосредственно под отвалом. Однако и в этом случае величины вариаций кулоновской функции малы и составляют всего несколько сотых мегапаскалей.

Наиболее опасный фактор инициирования значимых сейсмических событий — образование выемки большого размера в результате извлечения горной породы. Результаты расчетов, выполненных для всех карьеров Искитимского района Новосибирской области, показывают, что значимые положительные вариации функции Кулона ($\sim 0.3 \text{ МПа}$) на глубинах 3–4 км могут иметь место под выработками всех крупных разрезов. За пределами границы выработки величина $\Delta\sigma_c$ быстро снижается и достигает безопасного уровня $\sim 0.1 \text{ МПа}$ на расстояниях от 1 до 2.5 км от границ горной выработки. Это означает, что образование карьеров потенциально может привести к инициированию значимых сейсмических событий с магнитудой 3.5–4.5. Инициирование событий большей магнитуды крайне маловероятно из-за недостаточно большой площади выемки. Образование выемки глубиной 200 м не может быть причиной землетрясения, а может лишь несколько приблизить его время.

Можно заключить, что все землетрясения в Искитимском районе, эпицентры которых расположены на удалении более 1–2 км от границ карьера, имеют природное происхождение. Значимые землетрясения, гипоцентры которых будут расположены непосредственно под карьерами или в непосредственной близости, можно гипотетически отнести к инициированным событиям, но их сейсмический эффект будет сопоставим с эффектом массовых взрывов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с.
2. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., and Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes, *Earth-Science Rev.*, 2018, Vol. 178. — P. 438–514.
3. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // *Физика Земли*. — 2016. — № 2. — С. 22–44.
4. 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.
5. Маловичко Д. А. Изучение механизма Соликамского землетрясения 5 января 1995 г. // *Физ. мезомеханика*. — 2004. — № 7 (1). — С. 75–90.
6. Li T., Cai M. F., and Cai M. A review of mining-induced seismicity in China, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, Vol. 44. — P. 1149–1171.
7. 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 // *Геофиз. процессы и биосфера*. — 2019. — Т. 18. — № 3. — С. 104–116.
8. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Подкорытова В. Григорьевна, Куприш О. В., Шевкунова Е. В. Колывановское землетрясение 09.01.2019 г. с $ML=4.3$ около г. Новосибирска // *Интерэкспо Гео-Сибирь: сб. тр.* — 2019. — Т. 2. — № 2. — С. 36–45.
9. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Павленко О. В. Колыванское землетрясение 09.01.2019 г. с $ML=4.3$ и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна // *Вопр. инженер. сейсмологии*. — 2019. — № 4. — С. 29–45.
10. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
11. Мушкетов И., Орлов А. Каталог землетрясений Российской Империи. — СПб.: Типография Императорской Академии Наук, 1890. — 582 с.
12. Кишкина С. Б. Параметры сейсмического эффекта массовых короткозамедленных взрывов // *Вестн. НЯЦ РК*. — 2004. — Вып. 2. — С. 171–178.
13. Гончаров А. И., Куликов В. И., Минеев В. И., Седоченко В. В. Сейсмическое действие массовых взрывов на подземных и открытых работах // *Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН*. — М.: Геос, 2006. — С. 22–33.
14. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Сержников Н. А., Фатеев А. В., Ворона У. Ю., Шевкунова Е. В. Сейсмологический мониторинг промышленных взрывов как эффективный подход к контролю сейсмического воздействия на недра // *Интерэкспо Гео-Сибирь: сб. тр.* — 2019. — Т. 2. — № 5. — С. 56–66.
15. Бачманов Д. М., Кожурин А. И., Трифонов В. Г. База данных активных разломов Евразии // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2017. — Т. 8. — № 4. — С. 711–736.

16. **Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В.** Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $ML = 6.1$, $I_0 = 7$ (Кузбасс) // Рос. сейсмол. журн. — 2020. — Т. 2. — № 1. — С. 48–61.
17. **Кочарян Г. Г., Будков А. М., Кишкина С. Б.** Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 34–44.
18. **Das S. and Scholz C. H.** Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase, Bull. Seismol. Soc. Amer., 1983, Vol. 71. — P. 1669–1675.
19. **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. — P. 935–953.
20. **Механическое действие ядерного взрыва** / В. Н. Архипов, В. А. Борисов, А. М. Будков, В. В. Валько, А. М. Галиев, О. П. Гончарова, И. М. Зайков, Б. В. Замышляев, А. М. Кнестяпин, В. С. Королев, В. Д. Кузовлев, В. Е. Макаров, И. Ю. Селиверстов, Г. И. Семенов, В. В. Смазнов, Е. И. Смирнов, О. Н. Ушаков. — М.: Физматлит, 2003. — 384 с.

Поступила в редакцию 11/VI 2021

После доработки 15/VI 2021

Принята к публикации 30/VI 2021