

УДК 550.34; 622.235.535.2

**О ВЛИЯНИИ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ**

Г. Г. Кочарян, В. И. Куликов, Д. В. Павлов

Институт динамики геосфер РАН,

E-mail: gevorgkidg@mail.ru, Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

Представлены результаты измерений параметров сейсмического действия массовых взрывов, проводимых на карьерах и рудниках. Выполнены расчеты максимальной амплитуды сейсмических колебаний на глубине вероятного расположения потенциальных очагов техногенно-тектонических землетрясений значительной магнитуды. Полученные оценки и их сопоставление с результатами прецизионных деформографических наблюдений показали, что на сейсмогенных глубинах остаточные смещения по разлому при воздействии массовых взрывов в карьерах не превышают десятков – сотен микрон. Сейсмологические данные демонстрируют недостаточность таких воздействий для инициирования землетрясений больших магнитуд.

Массовые взрывы, сейсмический эффект взрыва, техногенные землетрясения, сейсмическая и геодинамическая безопасность горных работ

DOI: 10.15372/FTPRPI20190605

Научные интересы академика Евгения Ивановича Шемякина всегда включали вопросы механического и сейсмического действия взрыва на массив горных пород. Уже с самого начала своей научной деятельности в Ленинградской лаборатории Института химической физики АН СССР, возглавляемой С. А. Христиановичем, Е. И. Шемякин занимался теоретическими и экспериментальными исследованиями закономерностей распространения сейсмических волн, действием подземных и подводных взрывов на грунт и скальные породы, развитием взрыва в полости. Он принимал активное участие в экспериментальных работах, которые во многом определили дальнейшую теорию и практику взрывного дела: первый подводный ядерный взрыв в губе Черная (1955 г.), исследования действия литых сферических зарядов тротила в районе Куйбышевской ГЭС (1956), изучение механического и сейсмического действия подземного взрыва (Кабулсай, 1957), эффекта декаплинга (Тюя-Муюн, 1960) [1–5]. Работая в ИГД СО РАН, Е. И. Шемякин уделял много внимания “взрывному направлению” [6, 7]. Одна из последних его монографий посвящена сейсмическому эффекту массовых взрывов [8]. Это направление до сих пор активно развивается в институте его последователями [9, 10].

Евгений Иванович одним из первых осознал важную роль процессов локализации деформаций в массиве горных пород, в том числе при динамическом деформировании [11, 12]. В своих воспоминаниях о М. А. Садовском он пишет “...я стал понимать его (Садовского) ин-

терес к сибирским работам по большим деформациям, к развитию структуры...” [13]. Эти исследования получили развитие как в теоретических, так и в экспериментальных работах ИГД СО РАН [14, 15].

Определяющую роль в эволюции структуры массива горных пород играют разломы и тектонические трещины. В литературе регулярно обсуждается вопрос об инициировании довольно крупных землетрясений с магнитудой $m_b > 4$ массовыми взрывами при наземной и подземной разработке месторождений. Такие сейсмические события связаны с динамической подвижкой по существующему в массиве активному разлому. Считается, что регулярное воздействие на горный массив “потоков сейсмической (кинетической) энергии, создаваемых массовыми взрывами,.. порождает вибрационно-колебательные движения и относительные смещения блоковых структур земной коры, а также необратимые деформации по контактам и зонам разломов, приводя к концентрации на них тектонических напряжений как очагов землетрясений” [16]. При этом механика инициирования динамической неустойчивости, как правило, не обсуждается.

В настоящей работе результаты измерений параметров сейсмических колебаний от короткозамедленных взрывов при открытых и шахтных разработках и данные деформографических наблюдений используются для оценки возможности инициирования динамического скольжения по разлому.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ

Современная тенденция взрывной разработки месторождений твердых полезных ископаемых — увеличение объемов разрушаемых рудных блоков и соответственно мощности массовых взрывов. Эта тенденция диктуется необходимостью повышения экономической эффективности горного производства. Переход карьеров Курской магнитной аномалии к массовым взрывам мощностью более 1000 т взрывчатого вещества (ВВ), позволил установить трехнедельный цикл производства, включающий буровые работы, проведение взрыва и очистные работы на взорванных блоках. Увеличение суммарной мощности взрыва на Шерегешском руднике до 700 т дало возможность предприятию осуществлять всего два массовых взрыва в год [17]. Отмечается определяющая роль крупных (свыше 500 т) взрывов в инициировании сильных техногенно-тектонических землетрясений в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4$ [18]. После мощного Бачатского землетрясения в Кузбассе с магнитудой $M_L = 6.1$ (2013 г.) была ограничена суммарная мощность проводимых взрывов.

В Европейской части России наиболее интенсивные взрывные работы ведутся на железорудных предприятиях Курской магнитной аномалии. Так, Лебединский и Михайловский ГОКи перешагнули рубеж мощности массовых взрывов 3000 т ВВ. ИДГ РАН систематически проводит работы по регистрации параметров сейсмических волн стационарными и мобильными сейсмостанциями на различных расстояниях от взрывов.

Взрывы в карьере Лебединского ГОКа. Карьер Лебединского ГОКа имеет размеры на дневной поверхности 4×5 км, глубину около 400 м. Горный массив сложен железистыми кварцитами с крепостью 18–20 по шкале Протодьядонова. При подготовке массовых взрывов отдельные блоки горного массива разбуриваются скважинами длиной ~ 20 м и диаметром 270 мм. Скважины заряжаются эмульсионным взрывчатым веществом Тованом массой ~ 1 т. В блоке суммарная масса ВВ может быть 50–500 т, количество блоков 10–20. Суммарная мощность массовых взрывов варьирует от 1500 до 3000 т ВВ, общее количество таких взрывов в год ~ 25 . Для снижения сейсмического действия массовых взрывов применяется короткозамедленное взрывание, когда на одну ступень замедления приходится не более 10 т ВВ. Замедление

между ступенями или диагоналями блока составляет 42 или 67 мс. Три–пять рядом расположенных блоков взрываются последовательно друг за другом (каскад блоков). Через 15–20 с взрывается следующий каскад и т. д.

Параметры колебаний в стационарном измерительном пункте регистрируются тремя сейсмоприемниками СМ-3КВ (вертикальные колебания и горизонтальные в направлении юг–север и запад–восток). Полоса частот регистрации сейсмических каналов 0.5–80 Гц, частота оцифровки сигнала 1 кГц. В мобильном сеймопункте используется трехкомпонентный акселерометр А1638 с полосой частот регистрации 0.2–400 Гц при частоте оцифровки 10 кГц.

На рис. 1а приведена типичная сейсмограмма — вертикальная компонента скорости смещения грунта V_z , зарегистрированная при взрыве 16.03.2016 г. суммарной мощностью 2411 т. Массовый взрыв из 9 блоков, расположенных на расстоянии 1.14–3.6 км от сеймопункта, продолжался ~90 с, продолжительность колебаний от одного каскада блоков ~15 с. Суммарная продолжительность колебаний при этом взрыве составила ~40 с. Амплитуда колебаний при взрыве блока зависит от эпицентрального расстояния. Участок записи вертикальной составляющей колебаний свободной поверхности соответствует взрыву блока с массой ВВ 75.6 т, расположенного на расстоянии 1600 м (рис. 1б).

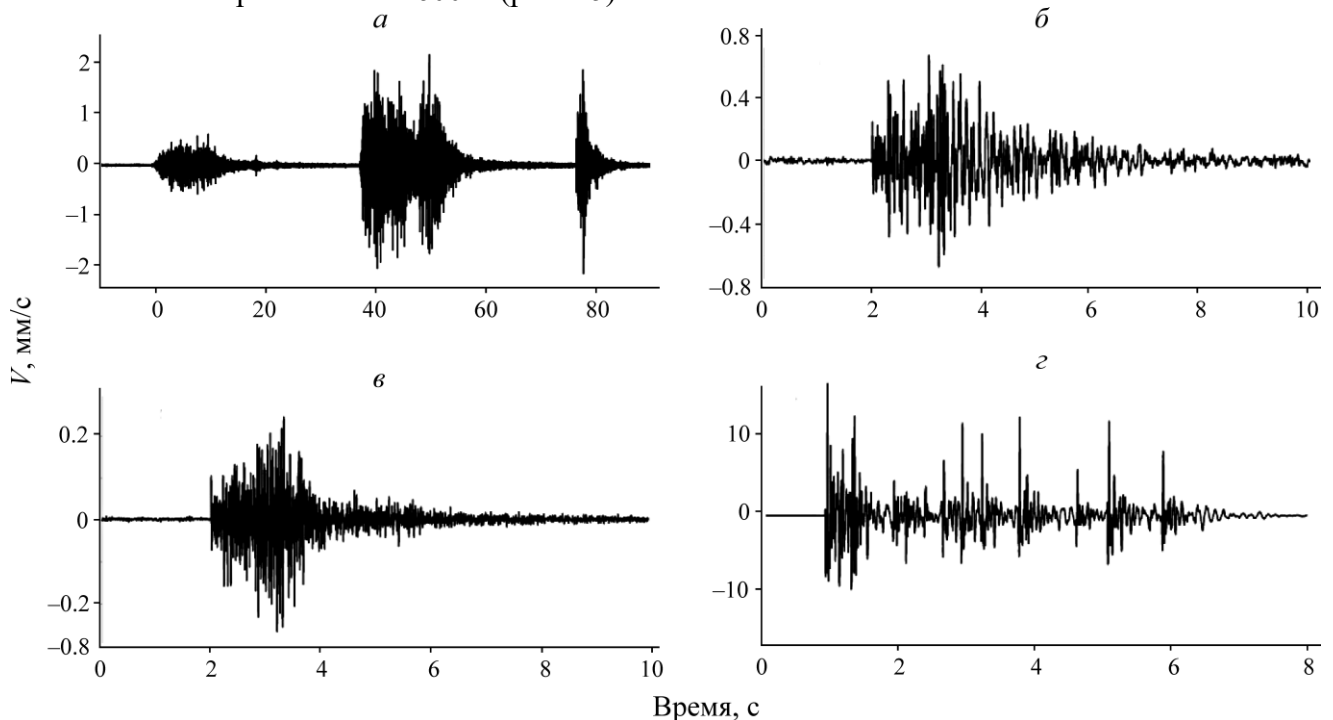


Рис. 1. Эпюры скорости смещения грунта: массовый взрыв на карьере Лебединского ГоКа: а — полная запись вертикальной компоненты колебаний на свободной поверхности, расстояния от блоков 1140–3600 м; б — вертикальная составляющая колебаний свободной поверхности от блока, расположенного на расстоянии 1600 м; в — вертикальная составляющая колебаний в штольне на глубине 263 м от свободной поверхности, расстояние от взрывающего блока 1600 м; г — взрыв на шахте им. Губкина (пояснения в тексте)

Спектр колебаний, рассчитанный методом быстрого преобразования Фурье для полной сейсмограммы массового взрыва показан, на рис. 2а. Видно, что основная энергия колебаний заключена в полосе частот 2–30 Гц. При оценке сейсмического действия взрыва на разломную зону используется максимальное значение модуля вектора скорости колебаний. В ходе работ 2019 г. получены данные по 24 массовым взрывам, в которых отработано более 200 блоков.

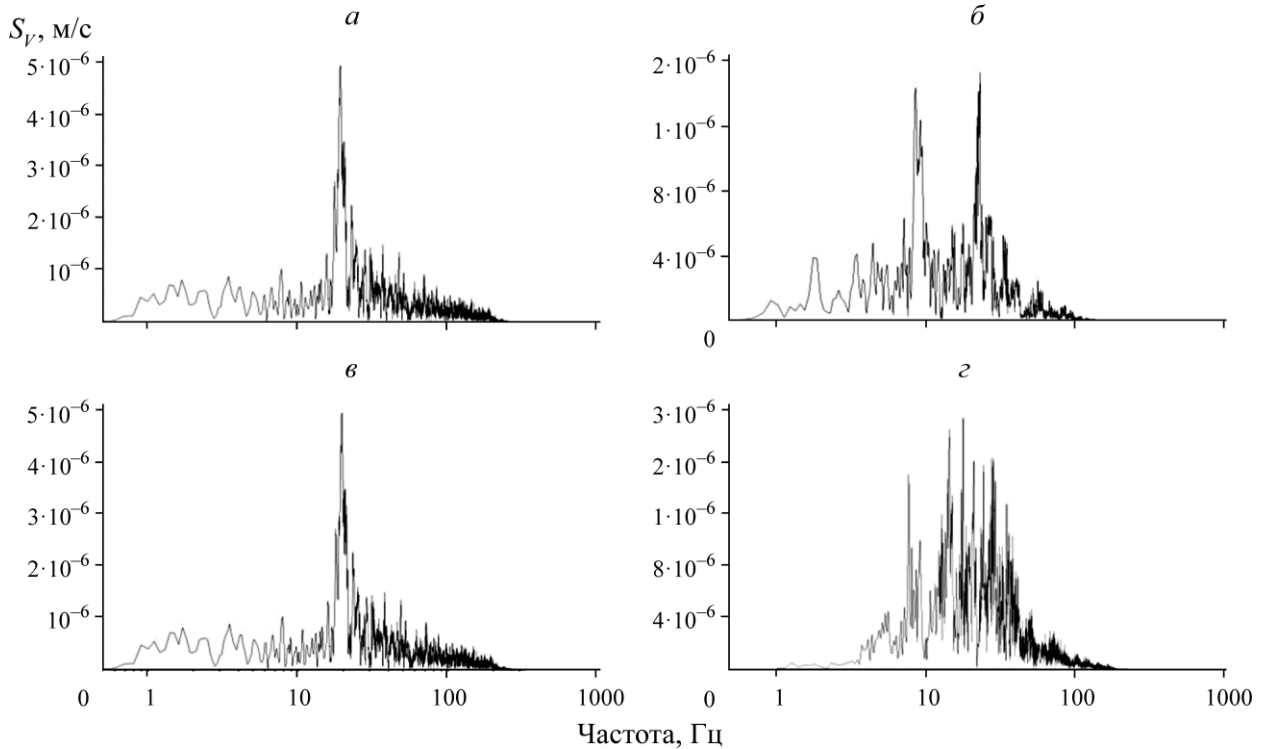


Рис. 2. Амплитудные спектры скорости смещения грунта: графики а–г соответствуют волновым формам, приведенным на рис. 1

Значения модуля вектора максимальной скорости колебаний $|\vec{V}_m|$ от приведенного эпицентрального расстояния $R/q^{1/3}$ обозначены значками с цифрой 1 (рис. 3). В качестве q принималась масса ВВ в ступени замедления (кг), R — эпицентрального расстояния до взрываемого блока (м). Соответствующей линией на рис. 3 показано наилучшее приближение данных $V = 2400(q^{1/3} / r)^{1.48}$, которое с хорошей точностью совпадает с зависимостью для карьеров Курской магнитной аномалии (Лебединский, Михайловский и Стойленский ГоКи), полученной ранее в [19].

Взрывы на шахте им. Губкина. Сейсмические пункты, расположенные на поверхности, регистрировали параметры сейсмических колебаний от взрывов на шахте им. Губкина. Разработка Коробковского железорудного месторождения велась подземным способом. Крепость пород та же, что и на Лебединском карьере. На шахте применяется этажно-камерная система разработки. Камеры находятся на глубине 245–285 м от дневной поверхности. При подготовке массовых взрывов на шахте горный массив разбуривается скважинами длиной 50–55 м и диаметром 105 мм. Суммарная масса ВВ в камере 10–20 т. Применяется короткозамедленное взрывание, на одну ступень замедления приходится 0.5–1.5 т ВВ. При каждом массовом взрыве с интервалом 30–50 с взрывается 3–4 камеры, расположенные на расстоянии ~1 км друг от друга. Типичная запись вертикальной скорости смещения грунта на свободной поверхности непосредственно над одной из камер показана на рис. 1г, а ее спектр — на рис. 2г. Суммарная масса ВВ в камере равна 10.3 т, а максимальная масса ВВ в одной ступени замедления — 0.518 т. В начале взрыва интервалы замедления между ступенями составляли 20 мс, в конце 500 мс, так что в конце записи легко выделялись волны от отдельных ступеней замедления. Длительность колебаний от взрыва одной ступени ~200 мс. Суммарная длительность колебаний не превышает 5–6 с. Из анализа амплитудного спектра можно заключить, что основная энергия колебаний сосредоточена в полосе частот 3–100 Гц (рис. 2г).

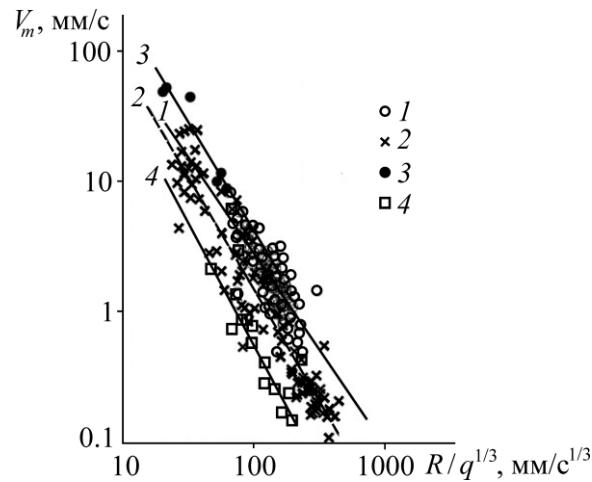


Рис. 3. Зависимость максимального значения вектора массовой скорости от гипоцентрального расстояния: 1 — Лебединский ГОК; 2 — шахта им. Губкина; 3 — Шерегешский рудник; 4 — Новогуровский карьер

Зависимость максимального значения вектора массовой скорости от гипоцентрального расстояния построена по результатам измерений 48 взрывов в 2019 г. и обозначена значками с цифрой 2 (рис. 3). Расстояние нормировано на максимальную массу ВВ в одной ступени замедления. Наилучшее приближение $V = 4110(q^{1/3} / R)^{1.7308}$ показано на рис. 3.

Результаты регистрации в подземных выработках несколько отличаются по параметрам от записей на свободной поверхности — колебания имеют более высокочастотный характер и заметно меньшую амплитуду, что следует учитывать при оценке воздействия массовых взрывов на разломные зоны (рис. 1б, в и 2б, в).

Параметры сейсмических колебаний зависят как от характеристик взрывааемых пород, так и от технологии работ. Для оценки их влияния на рис. 3 приведены результаты измерений, выполненных в разные годы на Шерегешском руднике в Горной Шории (крепость пород 14–16) и на Новогуровском карьере в Тульской области (крепость породы 5–8). Если при взрывах на Шерегешском руднике амплитуда колебаний соответствует верхней границе разброса данных для месторождений КМА, то для относительно слабых известняков Новогуровского карьера она заметно ниже. В целом приведенные данные перекрывают основной диапазон амплитуд сейсмических колебаний для массовых взрывов.

На основе результатов оценим параметры динамического воздействия массовых взрывов на разломы на ожидаемых глубинах расположения очагов крупных техногенно-тектонических землетрясений. Примем глубину расположения потенциального гипоцентра $R \sim 2–5$ км. Для карьерных взрывов масса ВВ в одной ступени замедления составляет несколько тонн ($q \sim 1–10$ т). Приведенное расстояние до очага $R/q^{1/3} \sim 100–500$ м/кг^{1/3}. Для взрывов в карьерах характерно большое количество ступеней замедления и длительное время воздействия — десятки секунд.

На большинстве рудников России применяется этажно-камерная система разработки, так что масса ВВ в одной ступени замедления не превышает 1–2 т, т. е. приведенное расстояние до будущего гипоцентра составляет не менее 150 м/кг^{1/3}. Длительность колебаний при взрывах в рудниках значительно меньше по сравнению с карьерами и редко превышает несколько секунд. В отдельных случаях применяются специальные технологии с одновременным взрывом большой массы ВВ: например, на Шерегешском руднике — до 100 т. В таких случаях приведенное расстояние до потенциального очага может оказаться заметно меньшим ($R/q^{1/3} \sim 50$ м/кг^{1/3}).

При проведении массовых взрывов как в карьерах, так и в шахтах, в соответствии с данными рис. 3 и с учетом меньшей амплитуды колебаний по сравнению со свободной поверхностью, максимальная скорость смещения грунта на глубинах более 2 км не превышает 2–3 мм/с, а в большинстве случаев $V_m < 1$ мм/с. При уникальных взрывах с одновременным взрывом большой массы ВВ (~100 т) значение V_m едва ли достигнет ~10 мм/с.

ОСТАТОЧНЫЕ СМЕЩЕНИЯ НА РАЗЛОМАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Для оценки последствий воздействия на разломы сейсмических волн взрыва воспользуемся моделью, согласно которой при воздействии на напряженный разлом колебаний формируется остаточное перемещение берегов [20]. Величина последнего зависит от параметров воздействия, напряженно-деформированного состояния и свойств разлома.

На рис. 4 показана диаграмма “сдвиговое напряжение–смещение” по разлому при повторяющихся динамических нагрузках. Модель отражает результаты, полученные в многочисленных лабораторных экспериментах [21]. В начальный момент времени состояние разлома соответствует восходящей ветви диаграммы “сдвиговое напряжение–перемещение” по разлому, показанной штриховой линией. Исходный уровень начальной деформации контролируется приложенным напряжением, касательным к плоскости скольжения. Сплошные линии 1 и 2 отражают текущее напряженно-деформированное состояние разлома в процессе деформирования. В случае низкого уровня статической нагрузки динамические воздействия малой амплитуды не приводят к потере устойчивости и процесс затухает (кривая 2), что связано с тем, что жесткость динамической нагрузки $k_s = d\sigma_s / dW$ во время каждого повторного цикла растет, постепенно приближаясь к жесткости ветви разгрузки [20]. В конце концов, этот эффект останавливает накопление остаточной деформации [22]. При уровне статической нагрузки, близком к пределу прочности σ_p , и достаточно высоких амплитудах сейсмической волны снижение жесткости, вызванное постепенным накоплением повреждений на контакте, преобладает над увеличением жесткости во время повторяющихся циклов нагружения. Наблюдается непрерывный рост остаточного смещения в процессе динамического воздействия, что ведет к увеличению скорости кумулятивной деформации. Если кумулятивное смещение по разлому превысит некоторую критическую величину W_c , разлом теряет устойчивость и происходит динамический срыв — землетрясение.

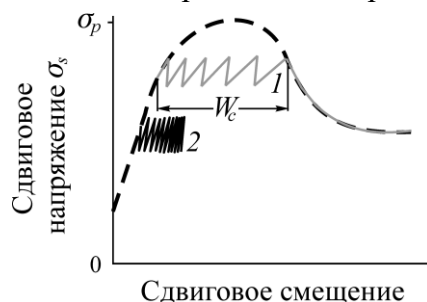


Рис. 4. Схема возникновения неустойчивости разлома при воздействии периодической нагрузки

Для приближенной оценки кумулятивного перемещения Δ можно использовать соотношение

$$\Delta \approx \alpha n \frac{\rho C_s V_m}{k_{s0}}, \quad (1)$$

где n — количество основных циклов в волновом пакете; C_s — скорость распространения поперечных волн, k_{s0} — начальное значение сдвиговой жесткости трещины.

Коэффициент $\alpha < 1$ зависит от напряженного состояния контакта и учитывает, что при разнонаправленных сдвигах остаточные перемещения частично компенсируют друг друга. В модельных экспериментах параметр α изменялся от 0.04 при $\sigma_s / \sigma_p \approx 0.5$ до 0.8 при $\sigma_s / \sigma_p \approx 0.99$. Для надежной оценки величины α для природных объектов данных недостаточно, но по результатам измерений при крупных подземных взрывах этот множитель оказывается на один – два порядка меньше, чем в лаборатории $\alpha \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ [20].

Используя для оценки “сверху” значения $\alpha = 0.01$, $k_{n0} \sim 10^7 - 10^8$ Па/м [20], получаем для взрывов в карьерах $V_m = 0.5 - 2.0$ мм/с, $n = 100 - 300$, $\Delta \sim 0.05 - 5$ мм. Для взрывов в шахте значение Δ будет в несколько раз меньше из-за меньшей длительности воздействия $n = 30 - 50$.

Прецизионные измерения перемещений по разломам при воздействии сейсмических колебаний от взрывов проводились на различных объектах. Методика измерений подробно изложена в [23]. Пример эпюры перемещения по тектонической трещине, расположенной на расстоянии 2.2 км от ближайшего взрываемого блока при массовом взрыве, приведен на рис. 5. Остаточные смещения отчетливо видны после прохождения сейсмических колебаний от взрыва последнего блока, ближайшего к разлому.

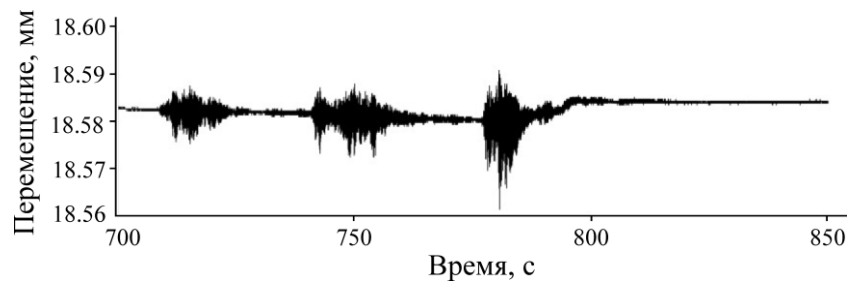


Рис. 5. Зависимость перемещения по тектонической трещине от времени при массовом взрыве на Лебединском карьере

Сводные результаты измерений остаточных перемещений при воздействии сейсмических колебаний от взрывов на различные разломные зоны показаны на рис. 6. Линия на рисунке — регрессионная зависимость:

$$\Delta W = 3.2 \cdot V_m^{1.06}, \quad (2)$$

построенная методом наименьших квадратов.

Тренд функции $\Delta W(V_m)$, как и зависимость (1), демонстрирует пропорциональность остаточных смещений амплитуде колебаний. Сейсмические колебания с амплитудой, различающейся на 1 – 2 порядка, инициируют близкие остаточные эффекты, что объясняется различным напряженным состоянием разломных зон. Оценка остаточного перемещения по соотношению (1) лежит на несколько порядков выше экспериментальных данных, что можно объяснить неопределенным значением коэффициента α , учитывающего близость напряженного состояния к критическому. На разломах, напряженное состояние которых близко к предельному, амплитуда перемещений может быть существенно выше. Об этом свидетельствуют результаты измерений амплитуды крипа, инициированного сейсмическими колебаниями от землетрясения с магнитудой $M = 7.1$ на разломах Южной Калифорнии [24] (рис. 6, вертикальными линиями обозначен разброс результатов измерений). Однако и в этом случае при воздействии низкочастотной поверхностной волны с максимальной скоростью смещения в несколько сантиметров в секунду амплитуда инициированного перемещения не превышала 1 – 2 мм.

Ожидаемое остаточное перемещение по разлому при максимальной массовой скорости $V_m \sim 0.3 - 0.6$ мм/с составляет порядка 10 мкм, а при самом интенсивном воздействии одновременно подрываемого заряда массой порядка 100 т не превышает 1 мм.

Чтобы разобраться, насколько значительны такие деформации, используем данные критического перемещения по разлому W_c , необходимого для возникновения землетрясения соответствующей магнитуды, полученные сейсмологами. Зависимость W_c от моментной магнитуды M_w построена по данным [25] (рис. 7). Если для события с магнитудой $M_w \sim 3$ эта величина $W_c \sim 1$ мм, то для землетрясения с $M = 6$ необходимое критическое перемещение $W_c \sim 50 - 100$ мм.

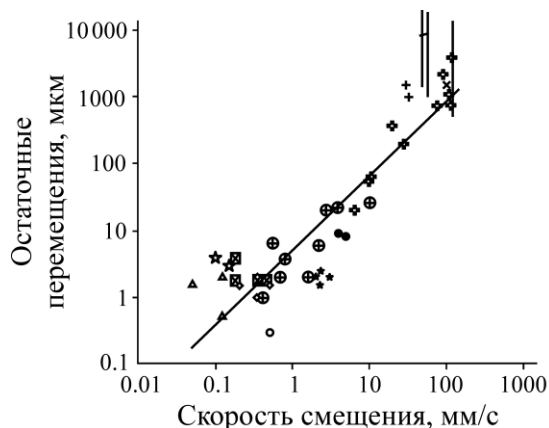


Рис. 6. Зависимость остаточных перемещений на нарушениях сплошности от максимальной скорости смещения в сейсмической волне

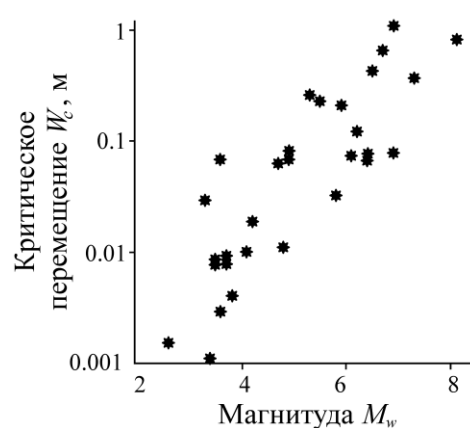


Рис. 7. Зависимость критического перемещения от магнитуды землетрясения

Оценки эффективности воздействия на тектонические разломы сейсмических колебаний от массовых взрывов не дают оснований обоснованно считать их факторами, провоцирующими крупные сейсмические события. В пользу этого свидетельствует и то обстоятельство, что дистанционное инициирование землетрясений сейсмическими волнами наблюдается, как правило, через некоторое время после вступления высокоамплитудных поверхностных волн. Инициирование высокочастотными объемными волнами менее эффективно. Судя по имеющимся данным, уровень деформаций $\sim 5 \cdot 10^{-7} - 10^{-6}$ является минимально необходимым для инициирования землетрясений сейсмическими колебаниями [26].

ВЫВОДЫ

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, а в большинстве случаев меньше 1 мм/с. Динамические напряжения в сейсмической волне на такой глубине могут достигать всего несколько килопаскалей, а деформации меньше 10^{-7} .

На сейсмогенных глубинах остаточные смещения по разлому при воздействии массовых взрывов не превышают десятков – сотен микрон. При уникальных взрывах амплитуда подвижки может составить ~ 1 мм. По сейсмологическим данным, таких воздействий недостаточно для инициирования землетрясений с магнитудами $M > 4$, хотя более мелкие индуцированные события, несомненно, могут иметь место. Основным фактором инициирования крупных землетрясений горными работами является выемка и перемещение больших масс породы, а не сейсмическое воздействие взрывов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шемякин Е. И., Файншмидт В. Л.** Распространение волн в упругом полупространстве, возбужденном поверхностной касательной силой // Учен. зап. ЛГУ. — 1954. — Сер. мат., № 177. — Вып. 28. — С. 148–179.
2. **Маркова К. И., Шемякин Е. И.** Распространение нестационарных возмущений в слое жидкости, находящемся в контакте с упругим полупространством // ПММ. — 1957. — Т. 21. — Вып. 1. — С. 57–66.
3. **Онисько Н. И., Шемякин Е. И.** Движение свободной поверхности однородного грунта при подземном взрыве // ПМТФ. — 1961. — № 4. — С. 82–93.
4. **Шемякин Е. И.** Расширение газовой полости в несжимаемой упруго-пластической среде (к изучению действия взрыва на грунт) // ПМТФ. — 1961. — № 5. — С. 91–99.
4. **Медведева Н. С., Шемякин Е. И.** Волны нагрузки при подземном взрыве в горных породах // ПМТФ. — 1961. — № 6. — С. 78–87.
5. **Кузьмина Н. В., Ромашов А. Н., Рулев Б. Г., Харин Д. А., Шемякин Е. И.** Сейсмический эффект взрывов на выброс в мягких грунтах // Труды ИФЗ АН СССР. — 1962. — № 6. — С. 3–72.
6. **Шемякин Е. И.** О поведении прочных горных пород при динамических нагружениях // ФТПРПИ. — 1966. — № 1. — С. 12–19.
7. **Шемякин Е. И.** Динамические задачи теории упругости и пластичности: курс лекций. — Новосибирск: Изд-во НГУ. — 336 с.
8. **Шемякин Е. И.** Сейсмозрывные волны в процессах горного производства. — М.: ННЦ ГП–ИГД им. А. А. Скочинского, 2004. — 75 с.
9. **Еременко А. А., Машуков И. В., Еременко В. А.** Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 70–76.
10. **Курленя М. В., Еременко А. А., Башков В. И.** Влияние взрывных работ на сейсмические и динамические явления при подземной разработке рудных удароопасных месторождений Сибири // Горн. журн. — 2015. — № 8. — С. 69–71.
11. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** Задачи механики сыпучих сред в горном деле // ФТПРПИ. — 1982. — № 3. — С. 19–25.
12. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** О структурно-дилатансионной прочности горных пород // ДАН СССР. — 1989. — Т. 305. — № 3. — С. 1077–1080.
13. **Садовский М. А.** Очерки, воспоминания, материалы. — М.: Наука, 2004. — 270 с.
14. **Косых В. П., Косых П. В., Ревуженко А. Ф.** Испытательный стенд для исследования эволюции сложного напряженно-деформированного состояния геоматериалов при слабых динамических воздействиях // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 198–203.
15. **Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф.** Моделирование процессов деформирования самонапряженных образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 15–24.
16. **Адушкин В. В.** Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. — 2016. — № 2. — С. 22–44.
17. **Еременко А. А., Филиппов В. Н., Никитенко С. М., Христолюбов Е. А.** Особенности освоения железорудных месторождений Горной Шории // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 79–95.
18. **Адушкин В. В.** Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59. — № 5. — С. 709–724.
19. **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.

20. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — М.: ГЕОС, 2016. — 424 с.
21. Кочарян Г. Г., Костюченко В. Н., Павлов Д. В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физ. мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 5–22.
22. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В., Виноградов Е. А., Гончаров А. И., Куликов В. И., Кулюкин А. А. О влиянии сейсмических колебаний на развитие тектонических деформаций // Докл. РАН. — 2009. — Т. 425. — № 1. — С. 98–100.
23. Адушкин В. В., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 3–14.
24. Rymer M. J., Boatwright J., Seekins L. C., Yule J. D., and Liu J. Triggered surface slips in the Salton Trough associated with the 1999 Hector Mine, California earthquake, Bul. Seismol. Soc. America, 2002, Vol. 92, No. 4. — P. 1300–1317.
25. Ellsworth W. L. and Beroza G. C. Seismic evidence for an earthquake nucleation phase, Sci., 1995, Vol. 268. — P. 851–855.
26. 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.

Поступила в редакцию 11/X 2019

После доработки 05/XI 2019

Принята к публикации 27/XI 2019