

УДК 550.34.016

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД**

З. З. Шарафиев, В. И. Куликов

*Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН,
E-mail: ZulfatSharafiev@yandex.ru, Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия*

Выполнены сейсмические наблюдения на отвалах карьера Михайловского ГОКа при проведении массовых взрывов. Получены зависимости амплитуды ускорения и скорости колебаний в сейсмозврывной волне от приведенного расстояния. Проведена оценка динамической устойчивости отвалов вскрышных пород. Показано, что на определенных приведенных расстояниях многократные сейсмические действия массовых взрывов могут привести к потере динамической устойчивости отвалов. Полученные результаты могут использоваться при проектировании массовых взрывов и выборе мест расположения и параметров отвалов вскрышных пород.

Обрушение склонов, многократные воздействия, буровзрывные работы, отвалы вскрышных пород, сейсмические колебания, массовые взрывы

DOI: 10.15372/FTPRPI20250305
EDN: MTRZXR

Обводнение грунта и высокая интенсивность сейсмического воздействия от землетрясений и взрывов — важнейшие причины нарушения устойчивости грунтовых склонов [1–3]. Большинство искусственных склонов на карьерах (борта карьера, отвалы вскрышных пород) неоднократно подвергаются воздействиям сейсмических волн от массовых взрывов. При этом в случае обрушения или деформации склона для анализа используются параметры сейсмического воздействия последнего массового взрыва. Согласно наблюдениям, нарушения устойчивости склона часто обусловлены накоплением остаточных деформаций вследствие многократно проводимых массовых взрывов на горнодобывающих предприятиях.

Искусственные склоны в карьерах, в том числе и на гидротехнических сооружениях, требуют большого внимания со стороны геомеханических и гидротехнических служб. Например, на отвалах вскрышных пород Михайловского ГОКа за последние два десятилетия произошли два оползня объемом ~ 20 млн м³ [4].

На всех этапах разработки месторождения необходимо обеспечивать безопасное и устойчивое состояние бортов карьера и отвалов вскрышных пород. В настоящей работе рассматриваются условия возможной потери устойчивости отвалов в карьере Михайловского ГОКа при многократном сейсмическом воздействии на них массовых взрывов.

Регулярно проводимые массовые взрывы при открытых горных работах влияют на устойчивость отвалов и бортов карьеров. Разрушение может происходить на отдельных локальных участках борта или отвала карьера при превышении на этих участках амплитуды сейсмозврывной волны PGA (амплитуды ускорения) некоторого критического значения a_c . В [5] a_c в сейсмической волне, субпараллельное наклону потенциального оползневого блока, является функцией статического фактора устойчивости и геометрии оползня:

$$a_c = (K_{3y} - 1) \sin \alpha, \quad (1)$$

где K_{3y} — запас устойчивости склона; α — угол откоса склона. Здесь и далее ускорение выражено в единицах g .

Запас устойчивости склона определяется как отношение удерживающих сил к сдвигающим:

$$K_{3y} = \frac{F_{уд}}{F_{сд}}. \quad (2)$$

Склон или его морфологический элемент считается устойчивым, если $K_{3y} > 1$. Коэффициент $K_{3y} \sim 1$ соответствует состоянию предельного равновесия, наблюдаемому в моменты начала и завершения оползневого смещения. При $K_{3y} < 1$ склон обрушается.

В квазистатических расчетах предполагается постоянное значение ускорения a_c , независимо от длительности сейсмического воздействия. В [2, 6] показано, что для получения наиболее достоверной оценки при определении динамической устойчивости необходимо учитывать максимальную скорость смещения грунта (PGV) в волне.

В ходе проведенных исследований [5] выявлено, что переход горного массива в предельное состояние при динамических воздействиях (массовых взрывах или землетрясениях) слабо зависит от геометрии склона, более существенно на него влияют физико-механические характеристики геоматериала. Экспериментальные данные подтверждают следующий принципиальный вывод: когда динамические напряжения, обусловленные действием инерционных сил (что соответствует высоким PGA), превышают критический предел прочности дискретной горной среды, в массиве неизбежно возникают необратимые деформационные изменения вне зависимости от амплитуды максимальной скорости смещения грунта в волне. Для крутых склонов с низкими K_{3y} значение PGA_{min} , при котором происходит потеря динамической устойчивости склона, значительно превышает критическое ускорение a_c , определенное по квазистатической схеме. С увеличением K_{3y} (для более пологих склонов) отношение PGA_{min} / a_c заметно снижается. В таком случае обрушение склона в большей степени зависит от PGV [5].

СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В КАРЬЕРЕ МИХАЙЛОВСКОГО ГОКА

На территории ГОКа амплитуды сейсмозврывных волн (смещения, скорости, ускорения) изменяются в достаточно широких пределах из-за вариации расстояния от отвала до взрываемого блока и массы ВВ в ступени замедления. Кроме того, существенную роль могут играть особенности строения массива взрываваемых горных пород.

Крупнейший в России и СНГ карьер Михайловского ГОКа специализируется на добыче и обогащении железной руды. Его горный массив сложен железистыми кварцитами крепостью $\sim 16-24$ по шкале Протодяконова, а также меловыми отложениями крепостью 2–5. Глубина залегания руд 100–500 м. Месторождение разрабатывается с помощью взрывов скважинных

зарядов. Диаметр скважин составляет 260–350 мм, их длина ~ 20 м, длина заряда ~ 10 м, масса ВВ в скважине ~ 1 т. При каждом массовом взрыве с интервалом 3–10 с взрывают последовательно 8–10 блоков. Масса ВВ в блоке варьирует от 10 до 1000 т, а суммарная мощность при массовом взрыве может достигать 3–4 тыс. т ВВ. В течение года проводится 12 массовых взрывов. Для уменьшения негативного сейсмического действия массовых взрывов на окружающую среду, охраняемые сооружения ГОКа и застройку региона применяется короткозамедленное взрывание. Обычно скважины в диагонали блока коммутируют в одну ступень замедления. На нее приходится ~ 10 т ВВ. Замедление между ступенями составляет 25–67 мс. В случае использования замедления между скважинами в диагоналях (поскважинное взрывание), масса ВВ в ступени замедления определяется числом скважин, которые детонируют в интервале времени 20 мс (видимый период колебаний на велосиграммах). Поскважинное взрывание позволяет уменьшить массу ВВ в одной ступени замедления до 3–6 т. В блоке массы ВВ в ступенях замедления могут отличаться, поэтому сейсмический эффект от взрыва каждого блока определяется максимальной массой ВВ в ступени замедления.

В настоящей работе исследования сейсмического действия массовых взрывов проводились с помощью мобильных сейсмических станций, размещенных на бортах карьера. Сейсмозврывные волны регистрировались акселерометром А1638. Полоса частот регистрации акселерометра 0.2–400 Гц, коэффициент преобразования 1 В/м/с². Сигналы с акселерометра оцифровывались с частотой 5 кГц АЦП Е-440 и записывались на ноутбук. При обработке путем численного интегрирования из акселерограмм получали велосиграммы и по трем компонентам рассчитывали векторы скорости и ускорений. Для сейсмозврывной волны от взрыва каждого блока определялись максимальные значения вектора скорости PGV и ускорения PGA в зависимости от приведенного эпицентрального расстояния (рис. 1).

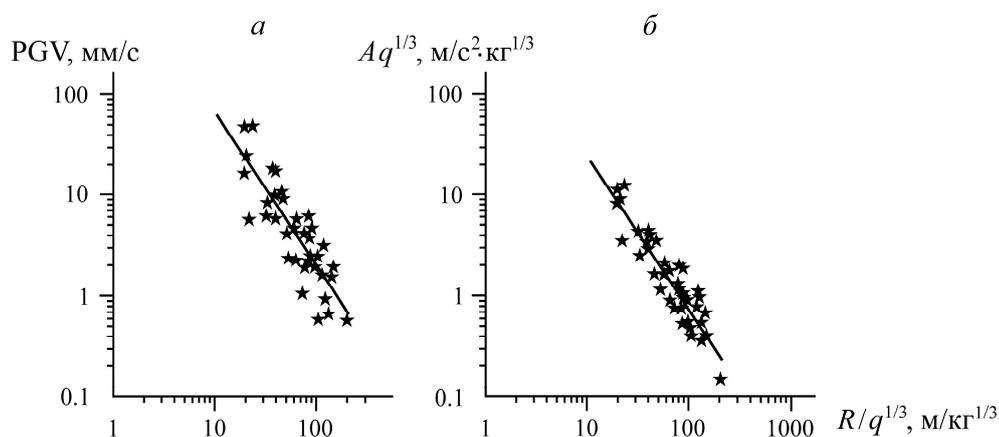


Рис. 1. Зависимость максимального вектора скорости колебаний (а) и максимального вектора ускорения (б) от приведенного расстояния

Прямые линии на рис. 1 — зависимости, полученные методом наименьших квадратов:

$$PGA \cdot q^{1/3} = 750 \left(\frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1.5}, \quad (3)$$

$$PGV = 2200 \left(\frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1.5}. \quad (4)$$

Здесь PGA — максимальный вектор ускорения, м/с^2 ; PGV — максимальный вектор скорости, мм/с ; q — максимальная масса заряда в одной ступени замедления, кг ; R — эпицентральное расстояние от взрываемого блока до точки регистрации, м . Поскольку массы ВВ в ступенях замедления одного блока могут различаться, то под q понимается ее максимальное значение для данного блока.

В соответствии с теорией подобия и размерности, для ускорения построена зависимость приведенного (по массе q) ускорения от приведенного расстояния. Из рис. 1 видно, что регистрация параметров сейсмозрывных волн велась на приведенных расстояниях $20–200 \text{ м/кг}^{1/3}$. При этом абсолютные расстояния от взрываемых блоков до пунктов регистрации составляли $260–2000 \text{ м}$, зарегистрированные амплитуды ускорения не превышали 10 м/с^2 , максимальные скорости смещения грунта — 50 мм/с . Данные рис. 1 и зависимость (4) согласуются с результатами исследований сейсмозрывных волн, проведенных при массовых взрывах на карьерах КМА [7]. Однако в цитируемой работе сейсмозрывные волны регистрировались на больших приведенных расстояниях свыше $50 \text{ м/кг}^{1/3}$, в настоящей — используются данные, полученные в ближней зоне взрыва.

На рис. 2 представлены результаты сейсмических наблюдений в карьере Михайловского ГОКа в координатах PGA и PGV. Так как масса ВВ в ступенях замедления при массовых взрывах на Михайловском ГОКе примерно одинакова и составляла $\sim 10 \text{ т}$, видна хорошая корреляция между максимальными ускорениями и максимальной скоростью (коэффициент детерминации $R=0.81$).

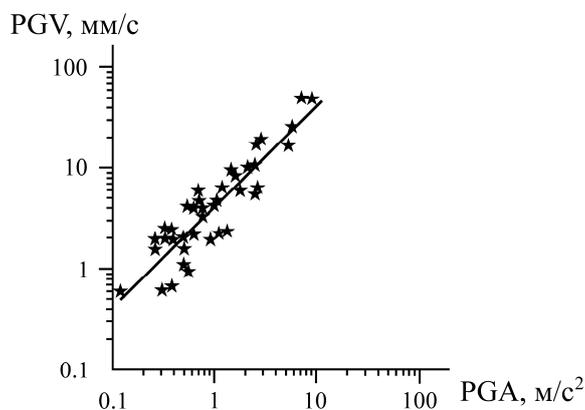


Рис. 2. Взаимозависимость параметров сейсмозрывных волн

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

Для оценки динамической устойчивости склона использовалась феноменологическая модель инициирования обрушения склона сейсмическим воздействием [5]. В ее основе лежит известный метод Ньюмарка [8]: сход оползня возможен лишь при достижении определенного порогового смещения D_N неустойчивой части массива относительно подстилающей поверхности. Согласно [9–13], при оценке динамического воздействия для разных грунтов, исходя из сравнения характеристик сейсмических колебаний и зафиксированных случаев схода лавин после землетрясений, критическое значение D_N составляет $\sim 5–10 \text{ см}$, для лавин из горных пород D_N уменьшается до $2–3 \text{ см}$.

В классической постановке задача о движении оползневого массива рассматривается как скольжение жесткого блока по наклонной плоскости, либо как вращение абсолютно твердого тела по поверхности смещения. С математической точки зрения данный подход предполагает двукратное интегрирование функции ускорения $a(t)$, полученной из сейсмического воздействия. Соблюдается ключевое условие: смещение оползня возникает только в те временные интервалы, когда ускорение превышает пороговое значение a_c . В методе Ньюмарка перемещение D_N служит мерой накопления деформаций в склоне.

Обрушение склона возникает в том случае, когда ускорение соскальзывающей части оползневого тела, вызванное сейсмическими колебаниями, превышает критическое ускорение [5]:

$$a_c = \frac{\frac{C}{\gamma z \cos^2 \alpha} + \left(1 - m \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \alpha} g, \quad (5)$$

где α — угол поверхности скольжения с горизонтом; m — коэффициент обводнения (отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения); γ_w — удельный вес воды; φ — эффективный угол внутреннего трения; C — эффективное сцепление; γ — удельный вес породы; z — толщина скользящего слоя (блока).

Как показано в [2, 5, 6], при оценке сейсмического воздействия на склон необходимо учитывать многократность проведения взрывов. Как отмечалось выше, на Михайловском ГОКе в год проводится порядка 12 массовых взрывов, каждый из которых состоит из 10 блоков. За 10 лет отвалы ГОКа испытали около тысячи сейсмозрывных воздействий. В случае обрушения склона, параметры воздействия принимаются по последнему событию, с которым ассоциируется обрушение. Это приводит к недостоверной оценке динамической устойчивости склона, так как при каждом сейсмическом воздействии массового взрыва в массиве склона происходит накопление деформаций, и при достижении критического уровня может произойти обрушение склона. При многократных воздействиях разрушение склона происходит при значительно меньших критических параметрах по сравнению с однократным. Это особенно выражено на крутых склонах с низкой устойчивостью, где критические скорости и ускорения снижаются. Если $\operatorname{PGA}_{\min}$ превышено, критическое перемещение, после которого происходит обрушение склона, накапливается в течение большого количества циклов сейсмозрывного нагружения [5].

Критическое ускорение a_c , согласно (5), формально не зависит от периода колебаний. Однако спектральный состав сейсмических волн вносит коррективы как в процесс разрушения отвала, так и в расчетную величину смещения Ньюмарка. Чтобы исследовать влияние спектра сейсмического сигнала на D_N , рассчитаны смещения Ньюмарка для землетрясения и взрыва. Использовались сейсмограммы от землетрясения в Турции (06.02.2023 г.) с магнитудой $M=7.7$, зарегистрированного на эпицентральной расстоянии 144 км, и массового взрыва в карьере Михайловского ГОКа, проводившегося на эпицентральной расстоянии 0.5 км с суммарным весом зарядов ~ 3 тыс. т ВВ (рис. 3а–в). На рис. 3в серым цветом обозначена акселерограмма и ее спектр массового взрыва на Михайловском ГОКе, черным — землетрясения в Турции. Максимальное ускорение в этих примерах примерно одинаково ($\operatorname{PGA}=0.33g$), а основные частоты колебаний f отличались на два порядка. При расчетах a_c изменялась от $10^{-3}g$ до $0.33g$.

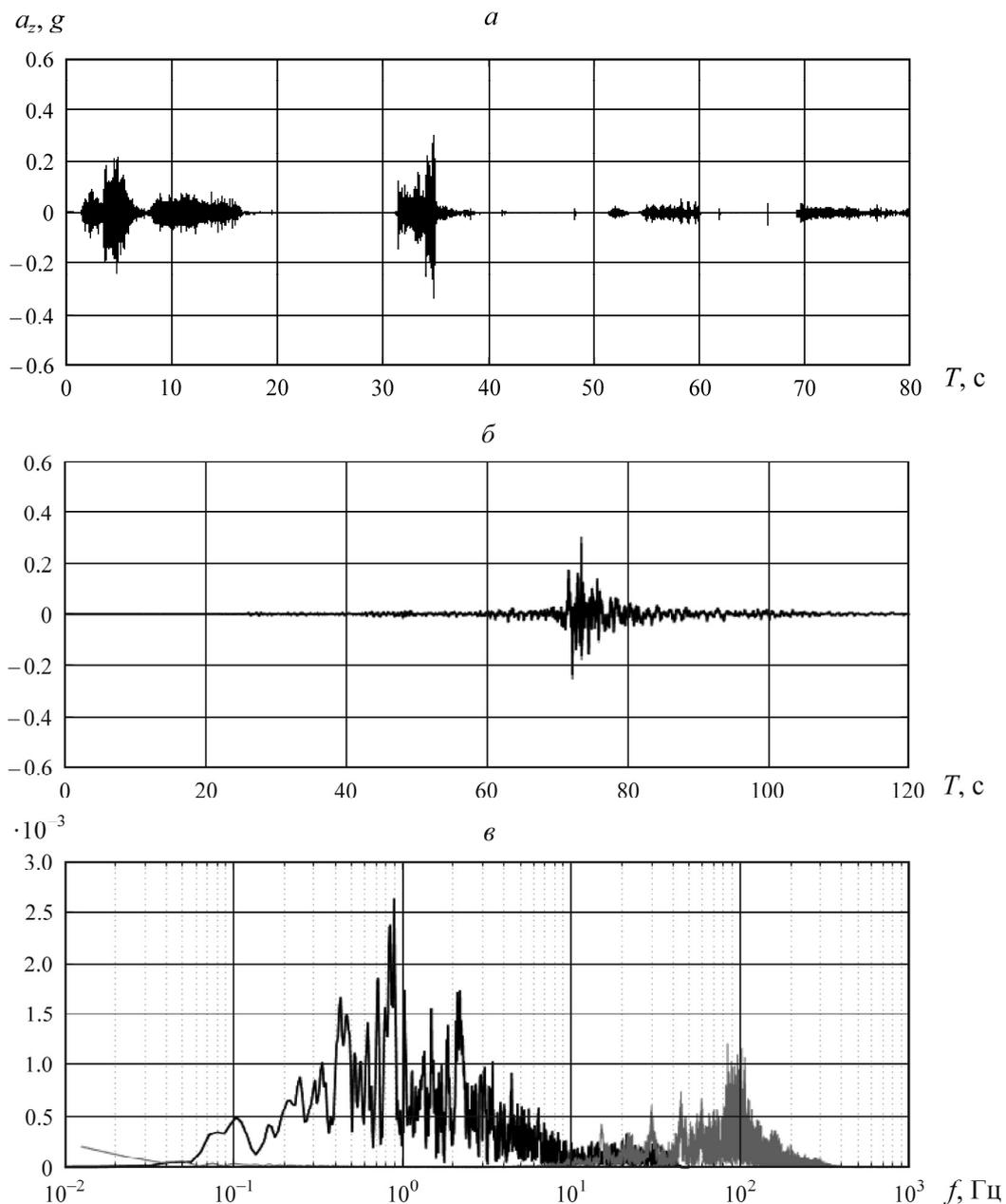


Рис. 3. Акселерограммы, зарегистрированные при проведении массового взрыва в карьере Михайловского ГОКа (а) и при землетрясении в Турции (б), и их спектры (в). Серым цветом показаны записи для взрыва, черным — для землетрясения

Результаты расчета смещения Ньюмарка для сейсмограмм землетрясения и взрыва представлены на рис. 4. Для землетрясения критическое смещение Ньюмарка 10 см достигается при $(PGA / a_c)_{\text{крит}} \sim 2.5$, для массового взрыва — при $(PGA / a_c)_{\text{крит}} \sim 20 - 30$. Это означает, что высокочастотная сейсмическая волна массового взрыва заметно менее эффективна по сравнению с волной от землетрясения с той же амплитудой PGA. Это связано с тем, что для длиннопериодной волны при одних и тех же ускорениях PGV будет существенно выше. Накопление деформаций при многократных воздействиях сейсмозрывных волн приводит к дополнительному снижению опасного ускорения PGA в 2 раза (до $\sim 10 - 15a_c$).

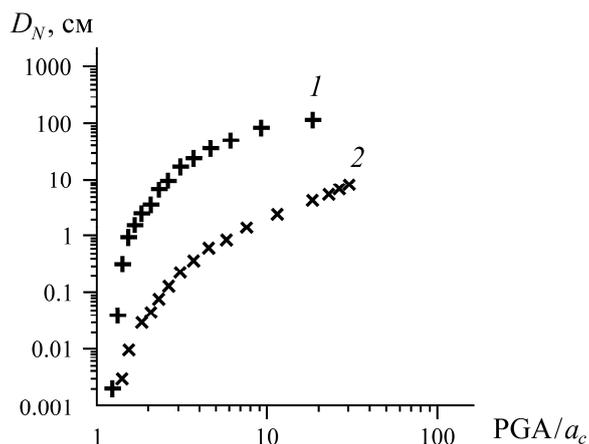


Рис. 4. Рассчитанное смещение Ньюмарка D_N в зависимости от отношения PGA/a_c : 1 — землетрясение в Турции; 2 — массовый взрыв в карьере Михайловского ГОКа

Для оценки возможной потери устойчивости откосов на отвалах карьера при многократном сейсмическом воздействии массовых взрывов достаточно определить минимальные PGA и PGV , при которых могут возникнуть обрушения наименее устойчивых откосов (отвалы вскрышных пород). Фрикционные характеристики пород (коэффициент трения и сцепление), слагающих отвалы на Михайловском ГОКе, приведены в [14] и составляют $\varphi = 24^\circ$, $C = 19.6$ кПа для суглинка, $\varphi = 20^\circ$, $C = 9.8$ кПа для глины бурой и $\varphi = 12^\circ$, $C = 68.6$ кПа для глины пестроцветной. Используя эти значения, с помощью соотношения (5) рассчитаны зависимости критического ускорения a_c (для однократного действия сейсмической волны землетрясения) от коэффициента обводненности для трех видов вскрышных пород в отвалах (рис. 5).

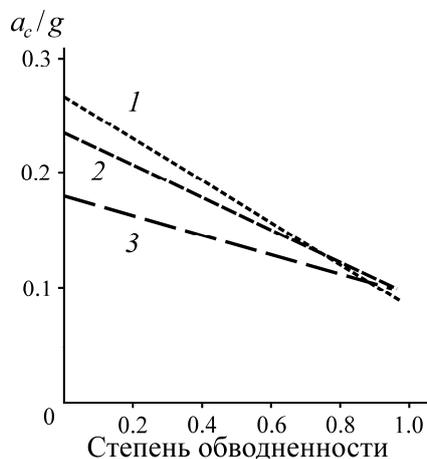


Рис. 5. Расчетные зависимости критического ускорения a_c от степени обводненности отвалов вскрышных пород при воздействии низкочастотных сейсмических колебаний от землетрясения. 1 — суглинок; 2 — глина бурая; 3 — глина пестроцветная

Для наиболее устойчивых откосов отвалов из сухого суглинка (при нулевом коэффициенте обводненности) ускорение a_c принимает значение $0.27g$ (критическое для однократного сейсмического действия землетрясения). В соответствии с результатами, приведенными на рис. 4, при многократном воздействии массовых взрывов для таких отвалов опасным уровнем ускоре-

ний является значение $\sim 2.7g$ ($\sim a_c$). Откосы из пестроцветной глины ($a_c = 0.18g$) — наименее устойчивые в необводненном состоянии. При полной обводненности отвалов для низкочастотного воздействия на них из всех трех типов пород a_c снижается до $0.1g$. Следовательно, при многократном сейсмозрывном воздействии минимальным уровнем ускорений PGA для обводненных отвалов всех трех пород будет $1g$.

Минимальной амплитуде ускорений в сейсмозрывной волне $PGA = 1g$ соответствует амплитуда скорости смещения грунта $PGV = 40$ мм/с (см. рис. 2). Такие амплитуды сейсмозрывной волны в карьере Михайловского ГОКа наблюдаются на приведенном расстоянии $12 \text{ м/кг}^{1/3}$ (см. рис. 1). Откосы обводненных отвалов, расположенные на этом и меньших приведенных расстояниях от блоков, могут разрушиться при многократном сейсмическом действии массовых взрывов. Если учесть, что максимальная масса ВВ в ступени замедления массовых взрывов на Михайловском карьере ~ 10 т, то расстояние от взрываемых блоков до потенциально разрушаемого отвала составит 240 м и менее. В настоящее время отвалы вскрышных пород Михайловского ГОКа удалены от карьера на 2 км, поэтому угроза их разрушения при сейсмическом действии массовых взрывов отсутствует.

Заметим, что для оценок можно не делать различия между вектором ускорения горизонтальных колебаний и полным вектором ускорений. Для монохроматических синфазных компонент колебаний (вертикальных и двух горизонтальных Ю–С и З–В) с одинаковой амплитудой они отличаются на 73% . На практике, как показывают расчеты вектора ускорений, из-за несинфазности акселерограмм это отличие составляет не более 20% . В настоящей работе напрямую сравнивались a_c и PGA.

Предложенный метод оценки условий устойчивости склонов отвалов вскрышных пород может использоваться при выборе площадок для новых отвалов вскрыши и для оценки устойчивости бортов карьера.

ВЫВОДЫ

Регулярное многократное сейсмическое воздействие массовых взрывов способствует кумулятивному нарастанию деформаций в материале склонов, что в конечном итоге может вызвать потерю динамической устойчивости откосов отвалов вскрышных пород. Для наименее устойчивых отвалов из обводненных суглинка и глины потенциально опасны взрывы блоков, расположенных на приведенных расстояниях менее $12 \text{ м/кг}^{1/3}$.

В настоящее время сейсмозрывное воздействие массовых взрывов в карьере Михайловского ГОКа является безопасным для откосов отвалов вскрыши из-за их удаленности от бортов карьера на расстояние, значительно большее критического. Полученные результаты следует иметь в виду при проектировании параметров массовых взрывов и при выборе площадок для размещения новых отвалов вскрыши.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А. И., Гальперин А. М., Стрельцов В. И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах. — М.: Недра, 1985. — 248 с.
2. Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Шарафиев З. З. Лабораторное исследование устойчивости горных склонов при динамических воздействиях // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 95–109.

3. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Зуев Б. Ю., Павлович А. А. Влияние землетрясений на устойчивость бортов карьеров // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 3–19.
4. Храмцов Б. А., Бакарас М. В., Кравченко А. С., Корнейчук М. А. Управление устойчивостью отвалов рыхлой вскрыши железорудных карьеров КМА // ГИАБ. — 2018. — № 2. — С. 66–72.
5. Куликов В. И., Шарафиев З. З. Феноменологическая модель для оценки устойчивости отвалов вскрышных пород // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 78–84.
6. Кишкин С. Б., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В., Шарафиев З. З. Лабораторное исследование устойчивости склона при импульсном динамическом воздействии // Динамические процессы в геосферах. — 2020. — № 12. — С. 62–70.
7. Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В. О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 49–58.
8. Newmark N. M. Effects of earthquakes on dams and embankments, *Géotechnique*, 1965, Vol. 15, No. 2. — P. 139–160.
9. Wilson R. C. and Keefer D. K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. America*, 1983, Vol. 73. — P. 863–877.
10. Wilson R. C. and Keefer D. Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding, *Earthquake Hazards in the Los Angeles Region — An Earth-science Perspective*, U. S. Geological Survey Professional, ed J. I. Ziony, 1985. — P. 317–345.
11. Jibson R. W. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis, *Earthquake-induced ground failure hazards*, Transportation Res. Board, 1993. — P. 9–17.
12. Jibson R. W. and Keefer D. K. Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the New Madrid seismic zone, *GSA Bull.*, 1993, Vol. 105, No. 4. — P. 521–536.
13. Keffer D. K. Landslides caused by earthquakes, *GSA Bull.*, 1984, Vol. 95, No. 4. — P. 406–421.
14. Панфилов А. Ю. Прогноз устойчивости карьерных откосов глинистых пород с учетом пространственно-временной изменчивости инженерно-геологических характеристик // ГИАБ. — 2006. — № 8. — С. 85–90.

Поступила в редакцию 24/IV 2025

После доработки 12/V 2025

Принята к публикации 16/V 2025