

УДК 550.34.016

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД**

**В. И. Куликов, З. З. Шарафиев**

*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*

Разработана феноменологическая модель инициирования оползня при многократном сейсмическом воздействии. В ее основе полученные в лабораторных экспериментах представления о закономерностях обрушения склонов под действием динамических нагрузок, результаты анализа большого объема натурных данных, инструментальные измерения сейсмического эффекта массовых взрывов, численные расчеты действия сейсмических колебаний на склоны. Сформулированы правила принятия решений при оценке возможности инициирования оползня сейсмическим воздействием. Проведена оценка устойчивости отвалов вскрышных пород карьеров Курской магнитной аномалии. Показано, что массовые взрывы в карьерах радикально не влияют на устойчивость отвалов вскрышных пород, однако нарушение работы дренажной системы, поднятие уровня грунтовых вод в отвалах могут привести к накоплению необратимых деформаций.

*Феноменологическая модель, оползни, обрушение склонов, многократные воздействия, отвалы вскрышных пород, сейсмические колебания, взрывы*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230509

Сейсмические колебания — основной триггер нарушения устойчивости склонов, находящихся в состоянии, близком к предельному равновесию. Обвалы и оползни являются наиболее распространенными проявлениями разрушительного действия землетрясений. В России подобные события регулярно происходят на склонах Северного Кавказа, Краснодарского края и некоторых других регионов.

Искусственные склоны на горнодобывающих предприятиях также подвергаются интенсивному сейсмическому воздействию. За последние несколько десятилетий на отвалах Михайловского ГОКа дважды возникали оползни объемом около 20 млн м<sup>3</sup> [1]. В Китае из-за нарушения устойчивости склонов в 2023 г. произошел один из самых крупных оползней, что привело к разрушению горнодобывающей инфраструктуры и к многочисленным человеческим жертвам. Эффективное и безопасное складирование рыхлых пород вскрыши и некондиционных полезных ископаемых имеет важное значение для экономики производства и охраны окружаю-

щей среды. Безопасность складирования в большей степени зависит от правильного выбора параметров склонов. Недооценка опасности приводит к возникновению аварий, разрушениям инфраструктуры, а иногда и к человеческим жертвам. Однако неоправданное снижение высоты и угла откосов приводит к существенному снижению экономической эффективности производства.

При оценке устойчивости склона широко применяется квазистатический подход, т. е. сейсмические силы рассматриваются как постоянно действующие, что может служить причиной неоправданного завышения прогнозируемых последствий сейсмического воздействия. Эффекты накопления деформаций при регулярном или периодическом воздействии сейсмических волн в литературе практически не рассмотрены. В этой связи оценка многократного сейсмического воздействия землетрясений и массовых взрывов, применяемых при разработке месторождений, на устойчивость склонов остается актуальной проблемой.

Цель настоящей работы — исследование эффекта потери устойчивости искусственного откоса при многократном сейсмическом воздействии массовых взрывов на основе разработанной феноменологической модели инициирования схода оползня.

#### **ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНА ПРИ МНОГОКРАТНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Феноменологическая модель базируется на широко известных принципах определения квазистатической устойчивости склона, которые дополнены представлениями, основанными на результатах проведенных лабораторных экспериментов [2–5], инструментальных исследований сейсмического эффекта массовых взрывов и анализа большого объема натурных данных [6–8].

Предлагаемую модель можно изложить в виде ряда положений:

- грунт смещается при совокупном действии статических (гравитация) и динамических (землетрясения, взрывы) нагрузок. Запас устойчивости характеризуется коэффициентом устойчивости  $FS$ , определяемым соотношением

$$FS = \frac{\sum R}{\sum T}, \quad (1)$$

где  $R$ ,  $T$  — суммы всех сил, удерживающих и сдвигающих склон соответственно.

При учете динамического воздействия к системе сил векторно добавляется сила инерции, определяемая ускорением  $a_c$  в сейсмической волне

$$a_c = (FS - 1) \sin \alpha; \quad (2)$$

- поверхность скольжения определяется наличием литологических границ, водоупоров и нарушений сплошности, сформированных на стадии статического предразрушения. Характер предразрушения и/или наличие естественных поверхностей скольжения обуславливает тип деформирования склона и при динамическом воздействии — обрушение (обвал), оползень, опрокидывание отдельных участков склона в окрестности гребня;

- один из важнейших триггеров неустойчивости склона — вода (сильные осадки, нарушение дренажной системы отвалов и пр.). Это может привести к обводнению тела оползня и радикальному снижению запаса устойчивости. Критическое ускорение, параллельное поверхности склона, при котором возникает необратимая деформация геоматериала, определяется выражением [3]:

$$a_c = \frac{\frac{C}{\gamma z \cos^2 \alpha} + (1 - m \frac{\gamma_w}{\gamma}) \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \alpha}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — угол между поверхностью скольжения и горизонтом;  $m$  — коэффициент обводнения (отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения);  $\gamma_w$  — удельный вес воды;  $\varphi$  — эффективный угол внутреннего трения;  $C$  — эффективное сцепление;  $\gamma$  — удельный вес породы;  $z$  — толщина скользящего слоя (блока);

- не менее важным эффектом, который необходимо учитывать, является разупрочнение пород (снижение эффективного коэффициента трения  $\operatorname{tg} \varphi$ ) при обводнении [9–11]. Эффект радикально выражен у филлосиликатных материалов (например, у хлорита, талька, смектита) и некоторых других глинистых пород. Кварцесодержащие породы менее подвержены эффекту ослабления трения;

- из результатов лабораторных экспериментов [2–5] следует:

- устойчивость склонов определяется уровнем напряжений, достигнутым при совокупном действии силы тяжести и силы инерции, характеризуемой пиковыми ускорениями в сейсмической волне —  $PGA$ , и кинематикой движения нарушенной области, т. е. максимальной скоростью смещения грунта —  $PGV$ ;

- существуют минимальные значения  $PGA_{\min}$  и  $PGV_{\min}$ . Если один из этих параметров ниже минимального значения, то обрушения не происходит независимо от значений второго параметра;

- $PGA_{\min}$  практически не зависит от угла склона и определяется лишь прочностными характеристиками материала;

- значение  $PGV$  при сохранении уровня ускорений и прочности грунта слабо влияет на уровень разрушения, но определяет деформацию, которая может быть достигнута. Если  $PGV$  недостаточно для инициирования обрушения, то необратимые деформации накапливаются. Подробно эти положения обоснованы в работах [2, 5];

- при многократном воздействии сейсмических волн критические параметры воздействия заметно ниже, чем при одиночном импульсе. Радикальное снижение  $PGV_{\min}$  наблюдается для всех склонов, тогда как  $PGA_{\min}$  резко снижается для склонов с малым запасом коэффициента устойчивости  $FS$  и слабо изменяется для склонов с большими значениями  $FS$ ;

- необходимыми условиями возникновения динамического обрушения при длительном низкоамплитудном воздействии являются превышение критического значения смещения относительно склона и достижение определенной средней скорости крипа.

Феноменологическая модель позволяет сформулировать алгоритм принятия решений при оценке возможности инициирования оползня сейсмическим воздействием, в том числе многократным:

- 1) по результатам геодезических измерений находится средний  $\alpha_0$  и максимальный  $\alpha_{\max}$  угол наклона откоса;

- 2) по данным геолого-геофизических обследований строится литологический разрез склона, определяются потенциальные поверхности скольжения, а также уровень обводненности;

- 3) экспериментально или по опубликованным данным устанавливаются эффективные значения сцепления  $C$  и угла трения  $\varphi$  по потенциальным поверхностям скольжения в сухом и водонасыщенном состоянии;

- 4) рассчитывается статический коэффициент устойчивости склона  $FS$  и критическое ускорение  $a_c$ ;

- 5) в случае отсутствия сведений по п. 1–3, следует принять значение  $FS \sim 1.05 - 1.50$ .

Критическое условие инициирования оползня сейсмическими колебаниями от землетрясения — достижение уровня ускорений  $PGA_{EQ} \sim 5-10a_c$ . При оценке устойчивости склона к множественному воздействию, например воздействию сейсмических колебаний от главного толчка и сильнейших афтершоков, критическое ускорение следует снизить вдвое.

При оценке опасности инициирования оползня сейсмическим воздействием от массовых взрывов следует рассматривать лишь возможный эффект накопления повреждений из-за достаточно высоких значений  $PGA$  в сеймовзрывных волнах и длинного цуга колебаний, но относительно малой скорости смещения грунта. В этом случае требуется экспертная оценка опасности на основе результатов деформационных или геодезических наблюдений, а также контроль обводненности склона.

#### ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ДЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КМА

В процессе разработки месторождения извлекаемая вскрышная порода удаляется и складывается в отвалы. На железорудных карьерах Курской магнитной аномалии (КМА) объем извлеченных вскрышных пород превышает 150 млн м<sup>3</sup> [1]. Предельные высоты отвалов изменяются от 45 м (ОАО “Стойленский ГОК”, отвал окисленных кварцитов) до 172 м (ОАО “Лебединский ГОК”, отвал № 2, рыхлые породы). Высота отдельных ярусов составляет 15–49 м. Углы откосов ярусов и отвалов изменяются от 5 до 38° [1]. Для рыхлых пород высота ярусов отвалов составляет 15–20 м, а угол наклона откоса до 33°. Особенность железорудных месторождений КМА позволяет формировать техногенные массивы отвалов из практически однородной по характеристикам массы геоматериала.

Для оценки устойчивости вскрышной толщи отвала можно воспользоваться значениями физико-механических свойств вскрышных пород месторождений КМА [12]. Средние характеристики суглинки с прослоями мела песка следующие:  $\alpha = 16-36^\circ$ ;  $\varphi = 19-36^\circ$ ;  $C = 50-80$  кПа;  $\gamma = 18.3$  кН/м<sup>3</sup>; водонасыщенность породы  $m = 0-1$ .

Необратимые деформации в толще склона будут возникать в том случае, когда ускорение, вызванное сейсмической волной, будет больше критического значения ускорения  $a_c$ , которое рассчитывалось по (3). Судя по результатам расчетов [3], при воздействии сейсмических колебаний от массового взрыва в карьере потенциально опасным является уровень ускорений выше  $\sim 20-30a_c$ . Многократность воздействия может привести к снижению опасного уровня ускорений до уровня  $\sim 10-15a_c$ . [2].

Глубина залегания поверхности скольжения может варьироваться в широких пределах из-за локальных условий и степени обводненности. Для демонстрации влияния толщины сползающего слоя на рис. 1 приведены расчеты фактора устойчивости  $FS$  и критического ускорения  $a_c$  для трех значений толщин соскальзывающего слоя (блока)  $z$ .

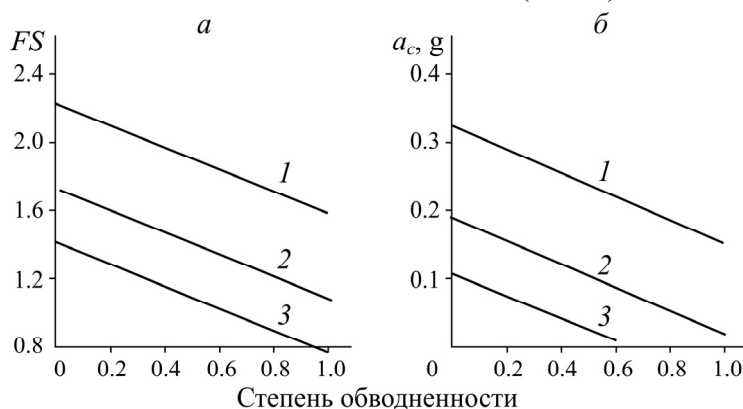


Рис. 1. Зависимость коэффициента устойчивости  $FS$  (а) и критического ускорения  $a_c$  (б) от степени обводненности грунта  $m$  для трех значений толщины оползня  $z = 10$  м (1), 20 (2) и 50 м (3) при  $\alpha = 16^\circ$ ,  $\varphi = 19^\circ$ ,  $C = 50$  кПа

Из рис. 1 видно, что наблюдается уменьшение уровня устойчивости отвала при увеличении толщины сползающего слоя. Если предположить, что наиболее неустойчивая зона или поверхность скольжения будет находиться между недавно возведенным ярусом отвала (наименее прочными рыхлыми породами) и более уплотненными рыхлыми породами, то при максимальной высоте яруса 20 м, величина  $z$  для наиболее устойчивого и наименее устойчивого из всех возможных вариантов  $z$  будет принимать значение 16.2 и 19.2 м. Это приблизительно соответствует расчету  $FS$  для  $z = 20$  м (рис. 1а).

На рис. 2 приведены результаты расчетов параметров  $FS$  и  $a_c$  для наиболее устойчивого и наименее устойчивого из возможных вариантов в зависимости от степени обводненности (отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения) склона  $m$ . Коэффициент статической устойчивости  $FS$  в зависимости от параметра  $m$  изменяется в диапазоне 0.82–2.05 при нормативном значении 1.20. При степени обводненности  $m \approx 0.29$  и при более высоких значениях в зависимости от прочностных свойств грунта и угла наклона откоса параметр  $FS$  становится меньше 1.20, что может привести к потере статической устойчивости отвала вскрышной толщ.

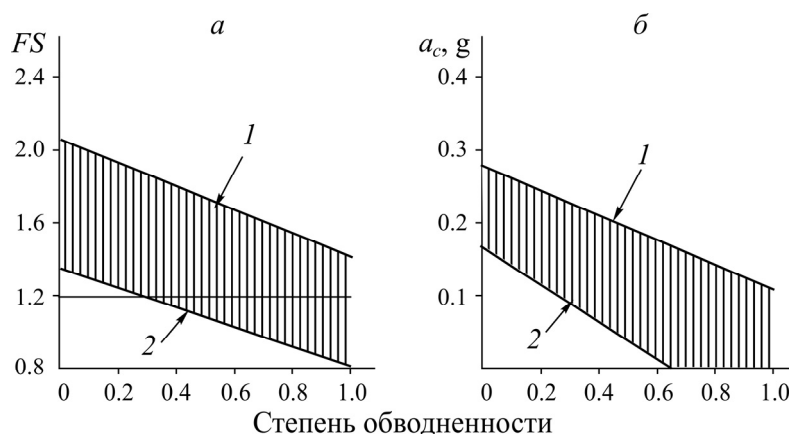


Рис. 2. Предельные зависимости  $FS$  (а) и  $a_c$  (б) от степени обводненности  $m$  вскрышных пород для наиболее при  $\alpha = 16^\circ$ ,  $\mu = 19^\circ$ ,  $C = 80$  кПа (1) и наименее при  $\alpha = 36^\circ$ ,  $\mu = 36^\circ$ ,  $C = 50$  кПа (2) устойчивых отвалов

Для наиболее устойчивых откосов при нулевой степени обводненности квазистатический уровень критического ускорения  $a_c$  принимает значение до 0.28g (рис. 2а). В этом случае при многократном воздействии массовых взрывов опасным уровнем ускорений в волне ( $\sim 10 - 15a_c$ ) является значение 2.80–4.20g. Для наименее устойчивого варианта сухого откоса это значение снижается до 1.60–2.40g. С ростом обводненности критические параметры могут уменьшиться до опасных значений. При степени обводненности  $m = 0.5$  для наименее устойчивых участков отвалов опасный уровень составляет  $\sim 0.40 - 0.60g$ .

На рис. 3 представлены значения зарегистрированных максимальных скоростей смещения и ускорений грунта в сейсмозрывных волнах на различных эпицентральных расстояниях от массовых взрывов в карьерах Михайловского и Лебединского ГОКов. Выделены граничные значения наиболее и наименее устойчивых откосов отвала (при  $m = 0.5$ ) в используемом диапазоне параметров. На диаграмме  $PGA - PGV$  выделена область, характеризующая параметры колебаний, при которых возможно обрушение откоса отвала при многократном воздействии сейсмозрывных волн. Параметры колебаний, при которых возможно обрушение наименее устойчивого варианта откоса ( $m = 0.5$ ;  $PGV_{\min} \approx 0.40g$  и  $PGV_{\min} \approx 0.23 - 2.40$  см/с), достигаются на эпицентральных расстояниях до 500–700 м от взрывааемого блока в карьере.

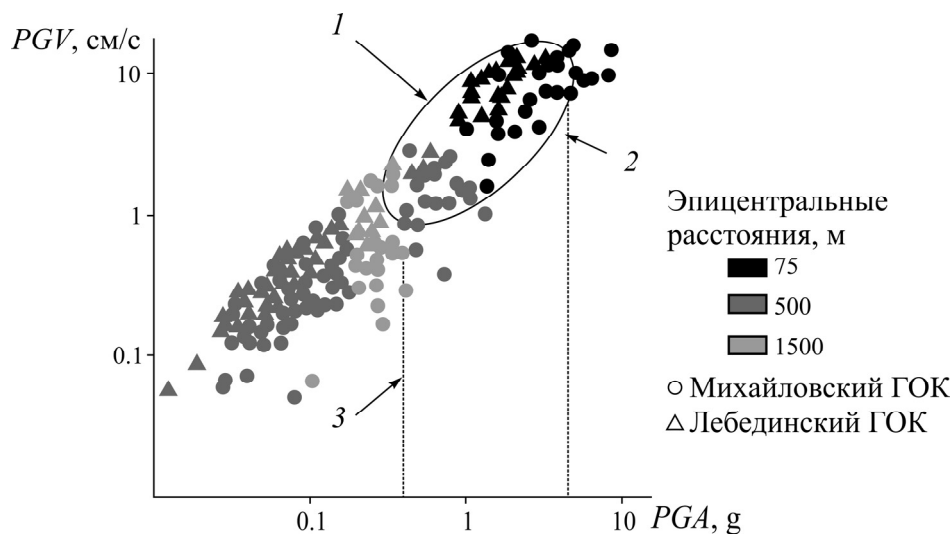


Рис. 3. Параметры сейсмозрывной волны: 1 — область значений, при которых возможно обрушение откоса отвала при многократном сейсмическом воздействии массовых взрывов; 2, 3 — значения пиковых ускорений для наиболее и наименее устойчивых откосов отвала при  $m=0$  и 0.5 соответственно

Мониторинг массовых взрывов показывает, что параметры сейсмозрывных волн для этих двух ГОКов близки, поэтому анализ устойчивости отвалов можно распространить на все карьеры КМА, в том числе и на карьер Стойленского ГОКа. В настоящее время сейсмическое воздействие массовых взрывов оказывает слабое влияние на устойчивость отвалов вскрышных пород. Фактическое расстояние от восточной до западной части карьера для Лебединского ГОКа около 1500 м, для Стойленского — ~1000 м. Если борт карьера в ходе разработки месторождения приблизится к кромке отвала ближе на 800–1000 м для Лебединского ГОКа, а для Стойленского ГОКа — на 300–500 м, то может наблюдаться интенсивное накопление деформаций в отвалах, что потребует проведения мониторинга деформационных процессов.

## ВЫВОДЫ

С помощью разработанной феноменологической модели оценена опасность инициирования оползня при многократном сейсмическом воздействии. Результаты исследований на Михайловском и Лебединском ГОКах предложено распространить на карьер Стойленского ГОКа. В настоящее время при реальных значениях параметров сейсмозрывных волн и расстояний между взрывающимися блоками в карьере и отвалами (не менее 1500 м для Лебединского ГОКа и 1000 м для Стойленского ГОКа) сейсмозрывное воздействие массовых взрывов на отвалы не приводит к обрушению откосов отвалов. Однако постепенное накопление деформации при многократном воздействии может привести к потере динамической устойчивости. Подъем уровня грунтовых вод, нарушение работы дренажной системы могут ускорить процесс подготовки разрушения. Необходим постоянный контроль за состоянием устойчивости отвалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Кочарян Г. Г., Шарафиев З. З., Кишкина С. Б., Чен Ц. Эффект снижения трения в основании гравитационного оползня под действием сейсмических колебаний // ФТПРПИ. — 2022. — № 2. — С. 3–14.
3. Кочарян Г. Г., Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Павлов Д. В., Шарафиев З. З., Каменев П. А. Иницирование обрушения склона сейсмическими колебаниями от разных источников // Физика Земли. — 2021. — № 5. — С. 41–54.
4. Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Шарафиев З. З. Лабораторное исследование устойчивости горных склонов при динамических воздействиях // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 95–109.
5. Кишкина 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.
6. Fotopoulou S. D. and Pitilakis K. D. Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings at precarious slopes subjected to combined ground shaking and earthquake induced landslide, Soil Dyn. Earthq. Eng., 2017, Vol. 93. — P. 84–98.
7. Wang T., Wu S. R., Shi J. S., Xin P., and Wu L. Z. Assessment of the effects of historical strong earthquakes on large-scale landslide groupings in the Wei River midstream, Eng. Geol., 2018, Vol. 235. — P. 11–19.
8. Forte G., Verrucci L., Giulio A. D., Falco M. D., Tommasi P., Lanzo G., Franke K. W., and Santo A. Analysis of major rock slides that occurred during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence, Eng. Geol., 2021, Vol. 290.
9. Кочарян Г. Г., Беседина А. Н., Гридин Г. А., Морозова К. Г., Остапчук А. А. Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса // Физика Земли. — 2023. — № 3. — С. 3–32.
10. Boulton C., Yao L., Faulkner D. R., Townend J., Toy V. G., Sutherland R., Ma S., and Shimamoto T. High-velocity frictional properties of Alpine fault rocks: Mechanical data, microstructural analysis, and implications for rupture propagation, J. Structural Geol., 2017, Vol. 97. — P. 71–92.
11. Бернштейн В. А. Механогидролитические процессы и прочность твердых тел. — Л.: Наука, 1987. — 320 с.
12. Житинская О. М. Влияние компонентов инженерно-геологических условий на устойчивость бортов железорудных карьеров при длительной их разработке: автореф. дис. ... канд. геолого-минер. наук. — М.: РГТУ им. Серго Орджоникидзе, 2018. — 26 с.

*Поступила в редакцию 23/VIII 2023*

*После доработки 12/IX 2023*

*Принята к публикации 15/IX 2023*