

УДК 622.023, 624.12

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА В СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ
НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ХОЕКА – БРАУНА**

К. Кан¹, И. К. Фоменко², Ц. Ван³, О. В. Никольская⁴

¹*Цзяннаньский университет, Школа окружающей среды и гражданского строительства,
E-mail: kevinkang8@mail.ru, г. Уси, Китай*

²*Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе,
E-mail: ifolga@gmail.com, ул. Миклухо-Маклая, 23, 117997, г. Москва, Россия*

³*Институт месторождений полезных ископаемых Китайской академии геологических наук,
E-mail: wangjiawei0824@163.com, г. Пекин, Китай*

⁴*Институт геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики,
E-mail: nikol-48@mail.ru, ул. Медерова, 98, 720055, г. Бишкек, Кыргызстан*

Для золоторудного месторождения “Чаараг” на стадии проектирования выполнена количественная оценка устойчивости откоса на основе обобщенного критерия прочности Хоека – Брауна, учитывающего масштабный эффект. Дополнительно использованы вероятностный метод и анализ чувствительности. Определены вероятности развития оползневой процесса и распределение коэффициентов устойчивости склона в зависимости от высоты и угла откоса. На основе синтеза классификационного подхода для учета масштабного эффекта, включающего рейтинговую классификацию GSI и вероятностный анализ, апробирована методика оценки устойчивости откосов в массивах скальных грунтов. Показано, что наибольшее влияние на устойчивость оказывает изменчивость индекса геологической прочности, с которым связан масштабный эффект.

Склон, откос, скальный грунт, массив, устойчивость, критерий прочности, масштабный эффект, риски, анализ, оценка

DOI: 10.15372/FTPRPI20200508

Горнодобывающая промышленность — приоритетная отрасль развития экономики Кыргызстана, при этом золотодобывающая промышленность занимает ведущее место. Золоторудные месторождения Кыргызстана нагорные и расположены в зонах тектонических нарушений, преимущественно разломов и их сочленений, что приводит к нарушению устойчивости бортов карьеров и подземных выработок на стадии строительства и эксплуатации [1]. Экономическая эффективность разработки месторождений полезных ископаемых напрямую связана с возникающими рисками при их освоении. Основным фактор при оптимизации системы “риск–экономическая эффективность” — согласование параметров разработки месторождений по-

Работа выполнена при финансовой поддержке “Special Funds Projects for Basic Scientific Research Business Expenses of Mineral Resources Research Institutes in Chinese Academy of Geological Sciences” (грант № КК2001).

лезных ископаемых с его инженерно-геологическими условиями. Выбор оптимальных параметров заоткоски уступов и генерального угла наклона борта карьера оказывает определяющее влияние на технико-экономические показатели отработки месторождения и безопасность горных работ. Решение вопросов устойчивости бортов карьеров, обеспечивающее безаварийное ведение горнодобывающих работ при длительной разработке месторождений, должно базироваться на современной методологии расчетов [2].

В практике расчетов устойчивости склонов в скальных грунтах широко применяется критерий прочности Хоека–Брауна, в основе которого заложен учет масштабного эффекта [3]. Он развивался поэтапно в течение четырех десятилетий, опираясь на результаты обобщения эмпирических данных [4]. Последняя версия данного критерия известна под названием “обобщенный критерий Хоека–Брауна” [5]. Именно она используется в настоящей работе при расчетах устойчивости откосов месторождения “Чаарат”.

Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона позволяет более обоснованно охарактеризовать опасность возникновения и активизации оползневых процессов в массиве пород [6–9]. Сущность данного анализа для скальных грунтов состоит в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от изменения параметров, входящих в критерий прочности Хоека–Брауна. Оценка чувствительности близка к вероятностному анализу. Однако вместо задачи о вероятности развития оползневого процесса в массиве пород от изменчивости факторов оползнеобразования дается решение о степени зависимости коэффициента устойчивости от закономерности изменения тех или иных параметров [6]. Анализ чувствительности позволяет прогнозировать распределение коэффициента устойчивости склона в зависимости от изменения одного или нескольких факторов оползнеобразования [10].

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧАЕМОГО ОБЪЕКТА

Месторождение “Чаарат” расположено в Джалал-Абадской области на правом борту р. Сандалаш на высоте 2400–2600 м над уровнем моря [1]. Это крупнейшее золоторудное месторождение Кыргызстана приурочено к зоне Караторского и Сандалашского надвигов, оперяющих Таласо-Ферганский разлом. Породы сформировались под действием дислокационного метаморфизма и смяты в складки. Весь участок разбит многочисленными тектоническими трещинами, имеющими различную ориентацию относительно будущего борта карьера. В пределах карьерного поля исследуемый участок месторождения сложен преимущественно красноцветными окварцованными песчаниками. Породный массив сильнотрециноватый, с зонами дробления. Среднее расстояние между трещинами 10–15 см (на 1 п. м находится до 70 различно ориентированных трещин) [11]. Показатель качества массива пород (RQD) не превышает 20–30%.

Оценка устойчивости прибортового массива карьера — актуальная задача при освоении нагорных месторождений открытым способом. Главным вопросом является учет в расчетах масштабного эффекта.

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ

Массив скальных грунтов — не случайный набор грунтов и имеет собственную внутреннюю структуру. Все элементы геологического тела взаимосвязаны и взаимообусловлены. При взаимодействии с сооружением массив работает как единое целое. Согласно [12], свойства массива горных пород не есть сумма свойств отдельных его частей, а представляют собой продукт этих час-

тей. Иными словами, прочностные характеристики массива скальных грунтов блочного строения зависят не только от свойств пород в образце, но и от структурных особенностей геологической среды (размеров блоков, интенсивности трещиноватости), т. е. от масштабного эффекта.

Известен масштабный эффект давно [13]. Выявлено, что с увеличением линейных размеров образцов антрацита прочность их существенно снижается [14]. В [15] описывается масштабный эффект в опытах со стеклом. В [16] установлена характерная особенность: масштабный эффект существенно проявляется при деформировании материалов, склонных к хрупкому разрушению, и менее выражен при испытаниях материалов, разрушающихся вязко.

В настоящее время для оценки масштабного эффекта используются следующие подходы [11]:

- *эмпирический подход*. Традиционно масштабный эффект оценивается через коэффициент структурного ослабления: $\lambda = K_{ст} / K_{об}$ ($K_{об}$, $K_{ст}$ — прочность в образце и исследуемой области массива грунтов соответственно) [17]. Величина λ непостоянна и зависит от степени раздробленности, прочности структурных блоков, ориентации поверхностей ослабления массива к направлению нормальных напряжений и т. д. В [18] предложена зависимость прочности скальных грунтов на одноосное сжатие от размера d : $\sigma_{cd} = \sigma_c^{50} (50/d)^{0.18}$ (σ_c^{50} — прочность на одноосное сжатие образца скального грунта диаметром 50 мм);

- *метод обратных расчетов*. Существует небольшое количество исследований, в которых коэффициент λ определяется путем анализа процесса разрушения массива при достаточно точно известных обстоятельствах. В этом случае коэффициент λ требует более основательной оценки, поскольку метод учитывает не только структурные особенности геологической среды, но и отражает все логические несовершенства, особенно в части функциональной зависимости между входящими в конечную формулу параметрами [13];

- *аналитический подход* описания отличия прочностных характеристик системы (агрегата) от свойств его структурных элементов основан на статистических теориях прочности [13];

- *классификационный подход* построен на рейтинговых классификациях, таких как система оценок качества геологической среды, RMR, Q-рейтинг, индекс геологической прочности (GSI) [5, 11, 19, 20].

В настоящей работе на основе синтеза классификационного подхода для учета масштабного эффекта, включающего рейтинговую классификацию GSI и вероятностный анализ, апробирована новая методика оценки устойчивости откосов в массивах скальных грунтов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ КАРЬЕРА В МАССИВЕ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

Основными входными параметрами для оценки устойчивости откосов проектируемого карьера являются морфология склона и физико-механические характеристики грунтов, слагающих массив. Для оценки устойчивости скальных грунтов применялась двухмерная модель склона с углами наклона откоса 45, 60 и 75° (рис. 1).

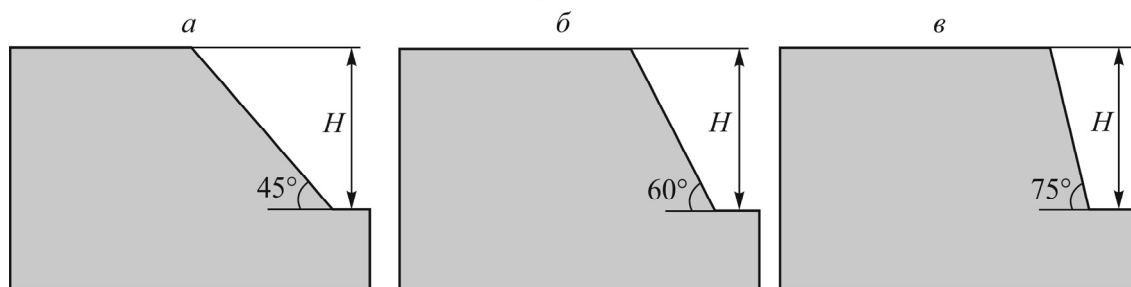


Рис. 1. Модели для оценки устойчивости массива пород при углах наклона откоса склона 45° (а), 60° (б), 75° (в); H — высота откоса

Обобщенный критерий Хоека – Брауна — пример нелинейного критерия прочности на сдвиг, разработанный для скальных грунтов. Его оригинальная версия представлена в 1980 г. для проектирования подземных выработок [4]. В 1988 г. критерий расширен для применения к задачам устойчивости склонов, а в 2002 г. разработан обновленный вариант, включающий улучшение корреляции между параметрами модели и индексом геологической прочности [5].

Основная идея критерия Хоека – Брауна состоит в учете масштабного эффекта при переходе от свойств в образце породы к свойствам в массиве. Обобщенный критерий Хоека – Брауна определяется как

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a,$$

где σ_1, σ_3 — эффективные главные напряжения; σ_c — прочность на одноосное сжатие; s, a, m_b — параметры критерия Хоека – Брауна:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right), \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right), \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}),$$

m_i — параметр литологического типа грунтов, например андезит, мергель, кварцит и т. п.; GSI — индекс геологической прочности, зависящий от структуры массива: ненарушенный, блочный, флишевый и т. д. (0–100); D — фактор антропогенной нарушенности массива горных пород (0–1); e — основание натурального логарифма (число “е”) [5].

На основе предельной огибающей критерия Хоека – Брауна можно получить эквивалентные параметры прочности Мора – Кулона (удельное сцепление c' и угол внутреннего трения ϕ') путем подбора линейной аппроксимации в исследуемом диапазоне напряжений.

Физико-механические параметры критерия Хоека – Брауна для скальных пород, применяемые в расчетах, приведены в табл. 1 [11]. Параметр D не зависит от типа, строения и физико-механических свойств исследуемого массива и является отражением техногенного воздействия на него. Для строительства карьера фактор нарушенности принимается равным 0.7–1.0, в зависимости от типа его разработки. Геомеханическая расчетная схема, использованная при оценке устойчивости склона в программной среде SLIDE 2, показана на рис. 2. Расчет устойчивости откоса выполнялся стандартным методом предельного равновесия, т. е. методом Бишопа, основанном на учете равновесия моментов [21].

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические параметры для количественной оценки устойчивости склона

Параметр скальных грунтов	Среднее значение μ	Среднеквадратичное отклонение σ	Коэффициент вариации, %	Тип функций распределения	Значения
Прочность на одноосное сжатие σ_c , МПа	200	30	15	Нормальный	110–290
Параметр литологического типа грунтов m_i	17	1.30	7		13–21
Индекс геологической прочности (GSI)	35	5	14.3		20–50
Фактор нарушенности D	0.85	0.05	6		0.7–1.0
Объемный вес γ , кН/м ³	25.70	0.30	1		24.8–26.6

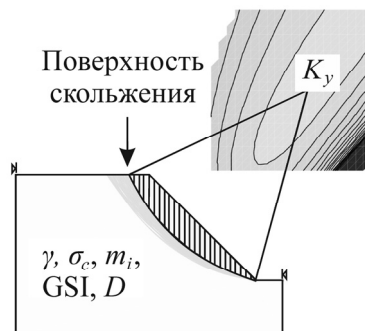


Рис. 2. Геомеханическая расчетная схема, использованная при анализе устойчивости склона в программной среде SLIDE 2: K_y — коэффициент устойчивости склона

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА

В настоящее время вероятностный анализ при количественной оценке устойчивости склонов и откосов почти не встречается. Отметим, что на формирование физико-механических параметров грунтов воздействуют различные случайные факторы, т. е. оползневый процесс не является детерминированным, и прочностные характеристики грунтов, если их рассматривать в пространственно-временном аспекте, представляют собой композиции случайных полей, которые можно описать с помощью вероятностной функции распределения. Сущность рассматриваемого анализа заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона K_y в зависимости от вероятностных функций изменения параметров, определяющих критерий прочности Хюека–Брауна (σ_c , m_i , GSI, D), и объемного веса γ . Принципиальное отличие вероятностного анализа от детерминированных расчетов — использование не фиксированных параметров свойств грунтов в виде нормативных или расчетных значений, а их функций распределения. Определены вероятностные функции распределения прочностных характеристик скальных грунтов. Графики функции плотности распределения, характеризующие изменчивость физико-механических свойств окварцованных песчаников, приведены на рис. 3.

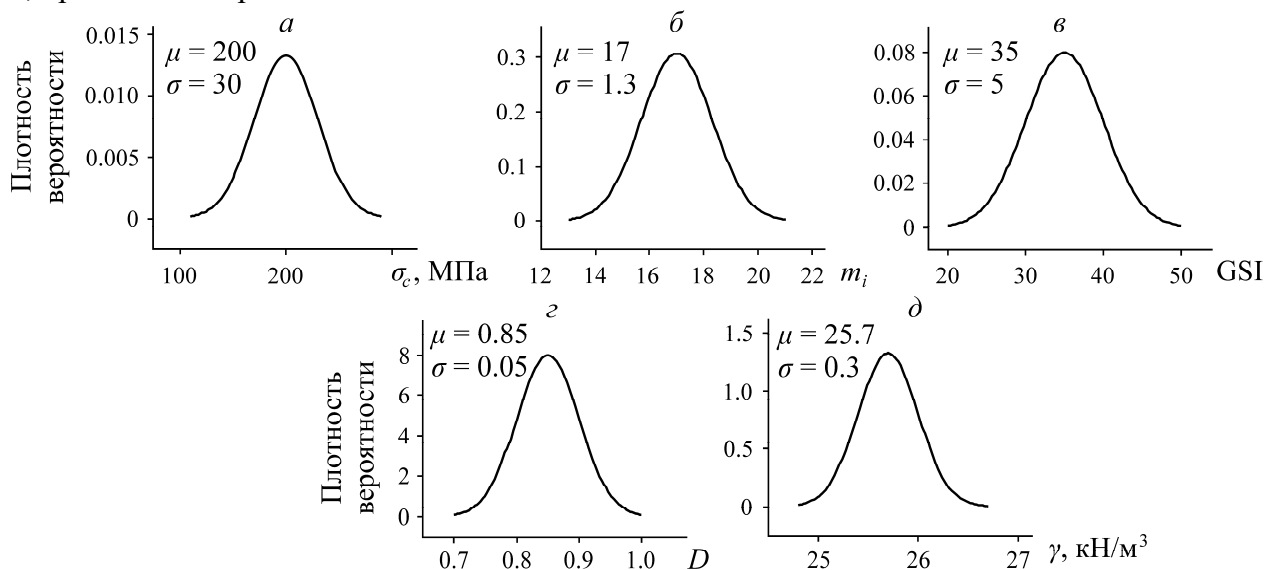


Рис. 3. Функции распределения факторов, учитываемых при расчете устойчивости склона: *a* — прочность на одноосное сжатие; *б* — параметр литологического типа грунтов; *в* — индекс геологической прочности; *з* — фактор антропогенной нарушенности массива горных пород; *д* — объемный вес

Далее на основе функций распределения показателей Хоека – Брауна с использованием метода Монте – Карло рассчитано вероятностное изменение K_y . При выполнении вероятностной оценки устойчивости склона проведено 2000 вычислений, учитывающих различные сочетания показателей свойств скальных грунтов. Каждый анализ выполнен методом Бишопа. Получена вероятностная количественная оценка устойчивости откоса (табл. 2). Здесь в отличие от детерминированных оценок, охарактеризованы средние значения устойчивости склона, вероятность ($K_y < 1$) в распределении величины K_y в расчетной выборке.

ТАБЛИЦА 2. Результаты вероятностной оценки устойчивости откоса

Высота откоса, м	Угол падения откоса, град	Средний K_y	Вероятность развития оползневых процессов ($K_y < 1$)
50	45	3.37	0
	60	2.51	0
	75	1.84	0.001
100	45	2.65	0
	60	1.94	0
	75	1.38	0.051
150	45	2.32	0
	60	1.69	0.001
	75	1.18	0.201
200	45	2.12	0
	60	1.53	0.004
	75	1.07	0.387
250	45	1.98	0
	60	1.43	0.012
	75	0.99	0.565

Полученные результаты данного анализа показаны на рис. 4, 5. Нахождение функции распределения устойчивости склона, представляющей собой оценку вероятности развития оползневых смещений, является дополнительной, вновь открывающейся возможностью при использовании подхода, основанного на учете изменчивости свойств грунтов [22]. Чем больше высота откоса, тем выше вероятность развития оползневых смещений (рис. 4). При высоте откоса менее 200 м, вне зависимости от принятой в расчете крутизны (от 45 до 75°), вероятность развития оползневых смещений менее 0.5%. При большей высоте откоса вероятность развития оползневых смещений для крутизны 75° составляет 0.565%. При высоте < 250 м все откосы с крутизной < 45° устойчивы (вероятность развития оползневого процесса равна 0).

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Анализ чувствительности близок к вероятностной оценке. Однако вместо задачи о вероятности развития оползневого процесса от прогнозной изменчивости факторов оползнеобразования решается вопрос о степени зависимости коэффициента устойчивости откоса от закономерности распределения тех или иных параметров. Таким образом, анализ чувствительности позволяет прогнозировать величину коэффициента устойчивости склона в зависимости от изменения одного или нескольких факторов оползнеобразования.

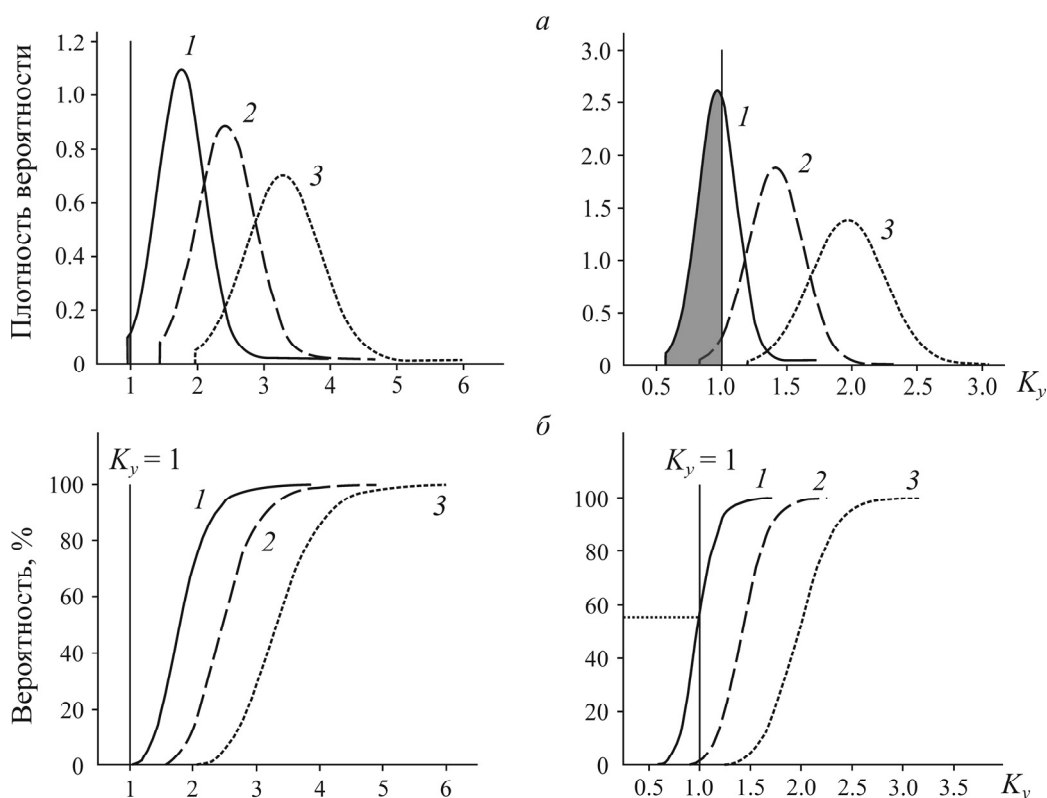


Рис. 4. Плотности распределения (а) и кумулятивные кривые вероятностей (б) для высоты откоса $H=50$ и 250 м: 1 — $\beta = 75^\circ$; 2 — $\beta = 60^\circ$; 3 — $\beta = 45^\circ$. Вертикальная линия — вероятность обрушения откоса ($K_y = 1$)

Анализ чувствительности выполнялся с учетом изменения высоты и крутизны откоса скального массива (рис. 5) [23, 24]. Для удобства все параметры распределены по значениям от 0 до 100 %. Нулевые величины соответствуют наименьшим показателям фактора, а значения 100 % — наибольшим. Например, нулевым значениям соответствуют величины прочности на одноосное сжатие 110 МПа. Полученные результаты анализа чувствительности (для крутизны откоса 75°) приведены на рис. 6. Наибольшее влияние на устойчивость склона оказывает изменчивость индекса геологической прочности (GSI) и фактора антропогенной нарушенности D .

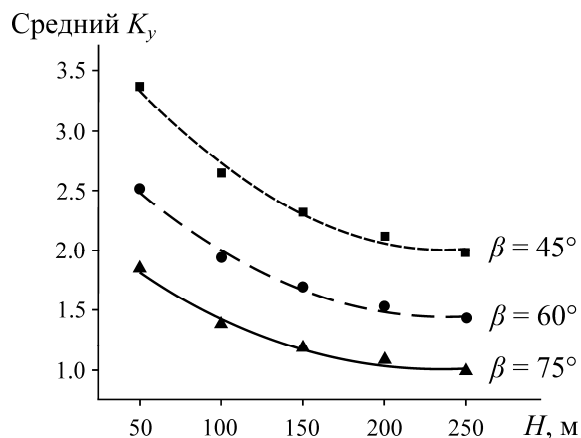


Рис. 5. Зависимости среднего K_y от высоты откоса

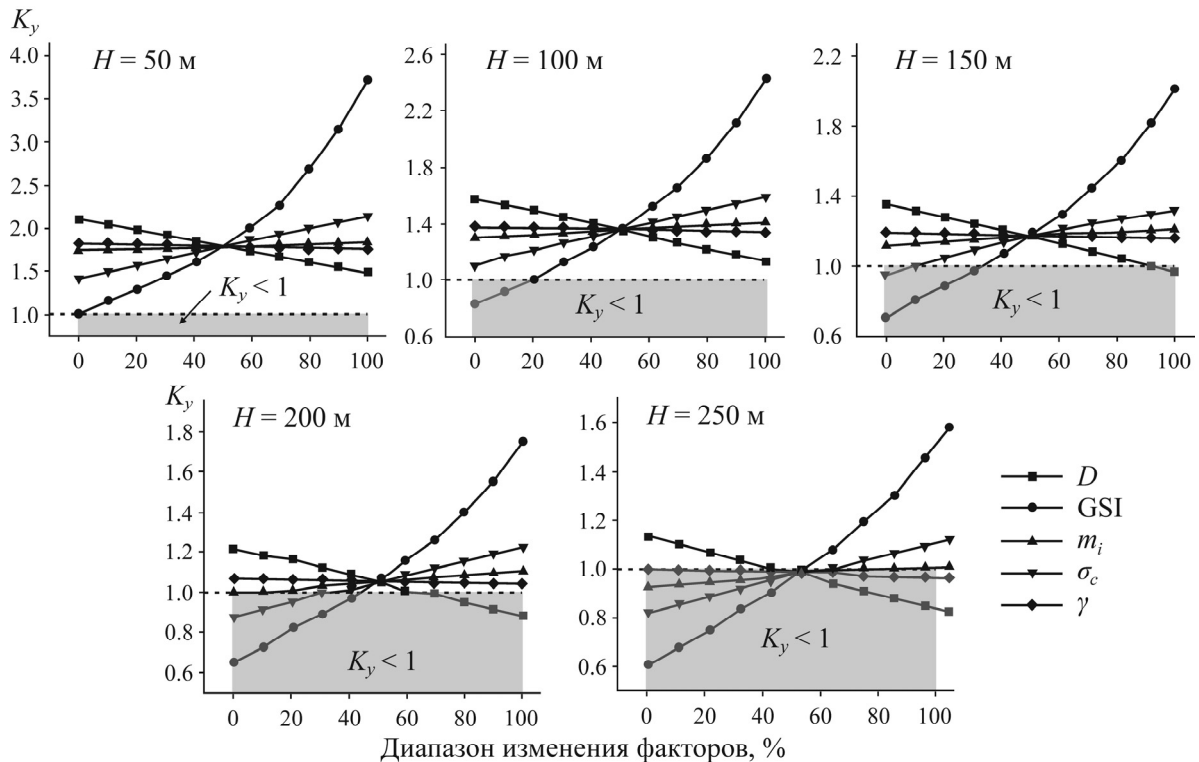


Рис. 6. Чувствительность устойчивости откоса ($\beta = 75^\circ$) к изменению факторов развития оползневой процесса

ВЫВОДЫ

Разработана и апробирована новая методика оценки устойчивости откосов в массивах скальных грунтов. Показано, что наибольшее влияние на устойчивость оказывает изменчивость индекса геологической прочности, с которым связан масштабный эффект.

Выполнение количественных оценок геологического и техногенного рисков, осуществляемых в практике разработки месторождения, требует анализа вероятности развития оползневых процессов. Используемые детерминистические подходы к получению оценок устойчивости откоса месторождения не всегда в полной мере дают возможности определить фактический уровень опасности, поскольку не позволяют установить взаимосвязь между получаемыми K_y и вероятностью развития оползневой процесса, т. е. выявить условия, при которых $K_y < 1$. Одним из путей решения данной проблемы служит применение вероятностного анализа, а значит получение вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций изменения физико-механических характеристик скальных грунтов, слагающих откос. Этот анализ позволяет более обоснованно охарактеризовать опасность активизации оползневых процессов. При этом важным дополнением вероятностного подхода к количественной оценке состояния склонов является выполнение анализа, заключающегося в рассмотрении значимости различных факторов в чувствительности откоса к потере устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожогулов К. Ч., Никольская О. В., Кадыралиева Г. А. Особенности свойств горных пород в зонах влияния тектонических нарушений золоторудных месторождений Кыргызстана // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф. — Пермь, 2014. — С. 273–277.

2. Ярг Л. А., Фоменко И. К., Житинская О. М. Оценка факторов, определяющих оптимизацию углов заложения откосов при длительной эксплуатации карьера (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА) // Горн. журн. — 2018. — Т. 2256. — № 11. — С. 76–81.
3. Зеркаль О. В., Фоменко И. К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости // Инж. геология. — 2016. — № 4. — С. 4–21.
4. Hoek E. and Brown E. T. Empirical strength criterion for rock masses, J. Geotech. Geoenviron Eng. Div. ASCE, 1980, No. 106. — P. 1013–1035.
5. Hoek E., Carranza-Torres C. T., and Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: Proc. of the 5th North American Rock Mech. Symp., Toronto, Canada, 2002, No. 1. — P. 267–273.
6. El-Ramly H., Morgenstern N. R., and Cruden D. M. Probabilistic slope stability analysis for practice, Canadian Geotech. J., 2002, Vol. 39, No. 3. — P. 665–683.
7. Griffiths D. V. and Fenton G. A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements, J. Geotech. Geoenviron, 2004, Vol. 130, No. 5. — P. 507–518.
8. Cho S. E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2010, Vol. 136, No. 7. — P. 975–984.
9. Кан К., Зеркаль О. В. Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона // Инж. геология. — 2017. — № 4. — С. 18–26.
10. Пендин В. В., Фоменко И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. — М.: Ленанд, 2015. — 320 с.
11. Кожоголов К. Ч., Никольская О. В., Кадыралиева Г. А., Джакупбеков Б. Т. Устойчивость бортов нагорных карьеров в зонах влияния тектонических нарушений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — № 2. — С. 240–244.
12. Мюллер Л. И. Инженерная геология. Механика скальных массивов. — М.: Мир, 1971. — 254 с.
13. Шашенко А. Н., Сдвижкова Е. А., Кужель С. В. Масштабный эффект в горных породах. — Донецк: Норд-Пресс, 2004. — 126 с.
14. Stuart F. A. Strengt and Stabilitu of pillars in coal mines, Ichem, Metallurg and Min. Sas S. Afrika, 1954, No. 9. — P. 118–124.
15. Griffith A. A. The Phenomenon of rupture and flow in solids, Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1921, Vol. 221. — P. 163–198.
16. Иоффе А. Ф., Кирпичев М. В., Левитская А. И. Деформация и прочность кристаллов // Журн. русского физ.-хим. о-ва. — 1924. — № 22. — С. 286–293.
17. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. — М.: Недра, 1976. — 272 с.
18. Hoek E. and Brown E. T. Underground excavations in rock, Inst. Min. Metal., London, UK, 1980. — 527 p.
19. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications, New York, John Wiley & Sons, 1989. — 251 p.
20. Barton N., Lien R., and Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support, Rock Mech., 1974, No. 6. — P. 189–236.
21. Bishop A. W. and Morgenstern N. Stability coefficients for earth slopes, Geotechnique, 1960, Vol. 10, No. 4. — P. 164–169.
22. Зеркаль О. В., Фоменко И. К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов // Инж. геология. — 2016. — № 1. — С. 16–21.
23. Чанышев А. И., Ефименко Л. Л. Оценка устойчивости слоистых откосов с позиций теории пластических деформаций // ФТПРПИ. — 2007. — № 4. — С. 49–60.
24. Подыминогин Г. М., Чанышев А. И. Определение максимально допустимой высоты борта карьера по схеме жесткопластического тела // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 32–40.

Поступила в редакцию 17/VI 2020

После доработки 03/VIII 2020

Принята к публикации 11/IX 2020