ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Анализ обрушения бортов на железорудном карьере Уэнса в Северо-Восточном Алжире методом конечных элементов: причины и выводы для контроля устойчивости

Ф.Бельгелиль, М.Фредж✉, А.Саадун, Р.Букарм
Университет Беджайя, Беджайя, Алжир

***Как цитировать эту статью*:** Бельгелиль Ф., Фредж М., Саадун А., Букарм Р. Анализ обрушения бортов на железорудном карьере Уэнса в Северо-Восточном Алжире методом конечных элементов: причины и выводы для контроля устойчивости // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587. EDN XIQXNW

***Аннотация*.** Обрушение бортов карьера при открытой разработке месторождений представляет собой большую трудность для контроля устойчивости бортов и требует подробного изучения причин. В статье рассматривается обратный анализ обрушения борта карьера на участке Зерга железорудного карьера Уэнса в Алжире. Основной целью исследования является определение причин обрушения бортов и разработка профилактических мер и методов повышения их устойчивости. Это позволит получить важные сведения для мониторинга устойчивости во время открытых горных работ. Исследование началось с реконструкции бортов в зонах влияния, после чего был проведен численный анализ с использованием метода снижения прочности на сдвиг в рамках метода конечных элементов SSR-FE. Этот метод позволяет исследовать устойчивость бортов как при статических, так и при динамических нагрузках. Оценка динамических нагрузок включала оценку вибраций, вызванных взрывными работами во время очистной выемки, что позволило включить сейсмическую нагрузку в анализ методом конечных элементов. Результаты показали, что основным фактором, спровоцировавшим обрушение борта, была вибрация, вызванная взрывными работами. Кроме того, устойчивость борта была серьезно нарушена при статических нагрузках, что свидетельствует о несоблюдении требований безопасного ведения открытых горных работ. Сложные геологические условия – наличие слоев мергеля, в которых возникает максимальная деформация на сдвиг – способствовали образованию поверхности обрушения борта. Исследование не только показало причины обрушения бортов, но и позволило сделать важные выводы для эффективного управления устойчивостью бортов карьера при открытых горных работах.

***Ключевые слова*:** обратный анализ; SSR-FE; вибрация; взрывные работы; открытый железорудный рудник; устойчивость бортов карьера; обрушение бортов карьера

Поступила: 25.07.2023 ***Принята: 02.05.2024*** ***Онлайн: 29.05.2024*** ***Опубликована: 26.08.2024***

Введение. Обрушение бортов карьера при открытой разработке месторождений, часто встречающееся в процессе эксплуатации, влечет за собой серьезные последствия для безопасности и экономики в зависимости от местоположения и масштабов [1-3]. Для проектирования устойчивых откосов бортов необходимо проводить комплексные геомеханические исследования [4-6]. Обычно устойчивость бортов оценивается путем определения коэффициента запаса, представляющего собой отношение пассивных и активных сил, действующих на борт. Коэффициент запаса выше единицы указывает на достаточную устойчивость, но неопределенность может привести к неустойчивости даже при значении коэффициента выше единицы [7-10]. В руководстве по проектированию откосов бортов выделяются критические условия с коэффициентами запаса ниже 1,3 и 1,1 для статических и динамических нагрузок соответственно [11].

Четкое понимание геологических, гидрогеологических, сейсмологических и технологических аспектов разрабатываемого участка, а также знание принятых методов необходимы для эффективной оценки устойчивости бортов карьера [12-14]. Среди численных методов в анализе устойчивости широко используется метод конечных элементов (МКЭ) [15]. Хотя точность результатов МКЭ зависит

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587
© Ф.Бельгелиль, М.Фредж, А.Саадун, Р.Букарм, 2024

от выбора технологических моделей и параметров [16-18], его преимущество заключается в минимальных допусках по поверхностям скольжения и распределении внешних сил [19-21].

В горном деле контроль устойчивости бортов требует более глубокого понимания потенциальных угроз, что часто достигается анализом свершившихся событий, связанных с обрушением бортов карьеров [22-25]. Обратный анализ, включающий реконструкцию наблюдаемых обрушений, является распространенной практикой на этапе разработки при появлении признаков неустойчивости [26]. В работе S.Sakurai [27] особое внимание уделяется использованию анализа чувствительности в программном обеспечении для решения плоских задач и обратного анализа устойчивости бортов. Этот метод позволяет определить свойства породного массива, оказывающие наиболее значительное влияние на устойчивость бортов [22]. Первым шагом к пониманию природных или антропогенных обрушений является точное определение геометрии поверхности обрушения [28-31].

Цель данного исследования – провести обратный анализ обрушения борта карьера на участке Зерга открытого железорудного рудника Уэнса в Алжире, определить причины обрушения и предложить методы его предотвращения. Сначала был реконструирован откос борта в зоне влияния, после чего был проведен численный анализ с использованием метода снижения прочности на сдвиг методом конечных элементов (SSR-FE) с помощью программного обеспечения Phase2 Finite Element, разработанного компанией Rocscience Inc*. Метод SSR-FE позволяет исследовать устойчивость бортов в условиях статического и динамического нагружений, включая влияние вибраций от взрывных работ и сейсмической нагрузки. Такой подход расширяет понимание механизма обрушения бортов и способствует повышению контроля устойчивости при добыче полезных ископаемых.

Методы. Численные методы являются эффективным и надежным способом решения широкого круга инженерных задач, и МКЭ – один из таких эффективных методов. В данном исследовании для анализа использовалось программное обеспечение Phase2, с применением метода SSR-FE получен коэффициент запаса. Метод SSR-FE вызывает интерес благодаря развитию компьютерных технологий. Когда борт карьера достигает состояния разрушения, при использовании SSR-FE неограниченное пластическое течение будет создано смещением по поверхности скольжения [32-34]. Многие работы показали эффективность метода SSR-FE при определении коэффициента запаса наклонных грунтов и скальных массивов [35-38], использование этого метода широко распространено и принято в ряде исследований [39-41]. Метод SSR-FE хорошо подходит для анализа сложных условий формирования бортов и позволяет получить представление о перемещениях, напряжениях и давлении.

В методе SSR-FE параметры прочности на сдвиг горной породы C или грунта φ уменьшаются на один понижающий коэффициент F*. Таким образом, можно получить новые параметры (C* и φ*), которые снова уменьшаются на другой понижающий коэффициент до тех пор, пока борт не окажется в состоянии предельного равновесия. В таком случае соответствующий коэффициент уменьшения называется коэффициентом уменьшения прочности (SRF). Этот метод предполагает последовательное уменьшение (на некоторые пробные коэффициенты) прочности пород борта карьера на сдвиг (C и φ) до тех пор, пока борт не примет неустойчивое положение. В методе SSR-FE обычно принимается прочность Мора – Кулона для пород борта. Этот критерий разрушения широко используется, поскольку является линейным, что значительно ускоряет время расчета. Уравнения для этого метода:

$$\tau^* = \frac{\tau}{F^*} = \frac{C + \sigma\tan\varphi}{F^*} = \frac{C}{F^*} + \frac{\sigma\tan\varphi}{F^*} = C^* + \sigma\tan\varphi^*;$$

$$C^* = \frac{1}{F^*}C;$$

* Rocscience (2016b) Phase2 version 8.02: Finite element analysis for excavations and slopes. Rocscience Inc, Ontario, USA. URL: https://www.rocscience.com/software/rs2 (дата обращения 25.07.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ф.Бельгелиль, М.Фредж, А.Саадун, Р.Букарм, 2024

$$\varphi^* = \arctan\left(\frac{1}{F^*}\tan\varphi\right),$$

где τ, C и φ – прочность на сдвиг, сцепление и угол внутреннего трения пород борта карьера до понижения соответственно; τ^*, C^* и φ^* – прочность на сдвиг, сцепление и угол внутреннего трения пород борта карьера после понижения соответственно; σ – нормальные напряжение в породах борта; F^* – понижающий коэффициент.

Важной функцией при проведении анализа SSR-FE также является возможность построить график максимальных деформаций в сравнении с SRF, что позволяет автоматически определять поверхность разрушения, а при добавлении сейсмических коэффициентов в метод конечных элементов можно определять влияние сейсмических колебаний на устойчивость борта. Сейсмические коэффициенты представляют собой максимальное виброускорение в долях от ускорения свободного падения. При его определении к каждому конечному элементу в сетке будет приложена дополнительная сила. Вибрации, возникающие в процессе взрывных работ, представляют собой комбинацию горизонтальных и вертикальных колебаний с определенным ускорением.

Методология. Анализ обрушения борта карьера Уэнса в Алжире проходил в несколько этапов. Сначала проведена реконструкция борта в двух зонах, где произошло обрушение. Следующим шагом стал геомеханический анализ методом конечных элементов при статическом и динамическом нагружении. Динамическая нагрузка представлена вибрационным воздействием от взрывных работ, оценка которого проведена с учетом сейсмического воздействия при анализе методом конечных элементов.

Анализ устойчивости. Состояние горных работ. Участок Зерга образован холмом Кудиат Эз-Зерга примерно в 3,5 км к юго-западу от центра города Уэнса. Административно он относится к муниципалитету Уэнса провинции Тебесса (рис.1). Участок Зерга является последней частью минерализованной оси месторождения железорудного карьера Уэнса, его структура проста и состоит из моноклинали аптского известняка, некоторые слои которого были замещены железной рудой. На этом участке встречаются выходы мергеля, залегающего вместе с моноклиналью. Аптский известняк пересечен жильной минерализацией, в основном флюоритом и баритом. Геологические запасы оцениваются в 3196457 т, которые еще предстоит разработать, с процентным содержанием железа 42,7 % [42, 43].

Эксплуатация участка Зерга началась в 1974 г. В течение нескольких лет в структурах происходили последовательные обрушения бортов, особенно в зоне, расположенной над северной частью рудного тела. В исследованиях отмечались несколько примечательных случаев на этом руднике: первые видимые проявления относятся к концу 1978 г. в центральной части участка. Другое обрушение, произошедшее в 1985 г., достигло северо-западной части первого уступа карьера во вмещающих породах, в 1986 и 1987 гг. – северо-восточной части второго уступа. В 2012 г. на этом руднике произошло еще одно обрушение, две зоны которого стали предметом данного исследования.

Зона 1 расположена в северной части участка Зерга, обрушения в этой зоне простираются в горизонтах от 826 до 731 м (рис.2, *а*). Зона 2 расположена в западной части участка, подвижки в этой части начались с верхнего горизонта 865 м и достигли отметки 755 м (рис.2, *б*). Общая площадь поверхности скольжения оценивается примерно в 30000 м^2.

Наличие и поведение грунтовых вод в районе железорудного рудника Уэнса играют ключевую роль в определении устойчивости бортов на участке. Хотя различные формации на месторождении не имеют крупных подземных водоносных горизонтов, характеристики каждого геологического слоя оказывают существенное влияние на движение и доступность грунтовых вод.

Триасовый диапировый слой, служащий местным водоупорным пластом, препятствует циркуляции воды, затрудняет их проникновение. Вместе с тем, массивные известняковые образования, хотя и обладают сильной трещиноватостью в исходном состоянии, позволяют просачиваться грунтовым водам, но медленно. С другой стороны, мергели обладают непроницаемыми свойствами, в результате чего дождевая вода стекает или испаряется, за исключением тонких известняковых прослоев, которые обычно имеют ограниченную протяженность.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587
© Ф.Бельгелиль, М.Фредж, А.Саадун, Р.Букарм, 2024

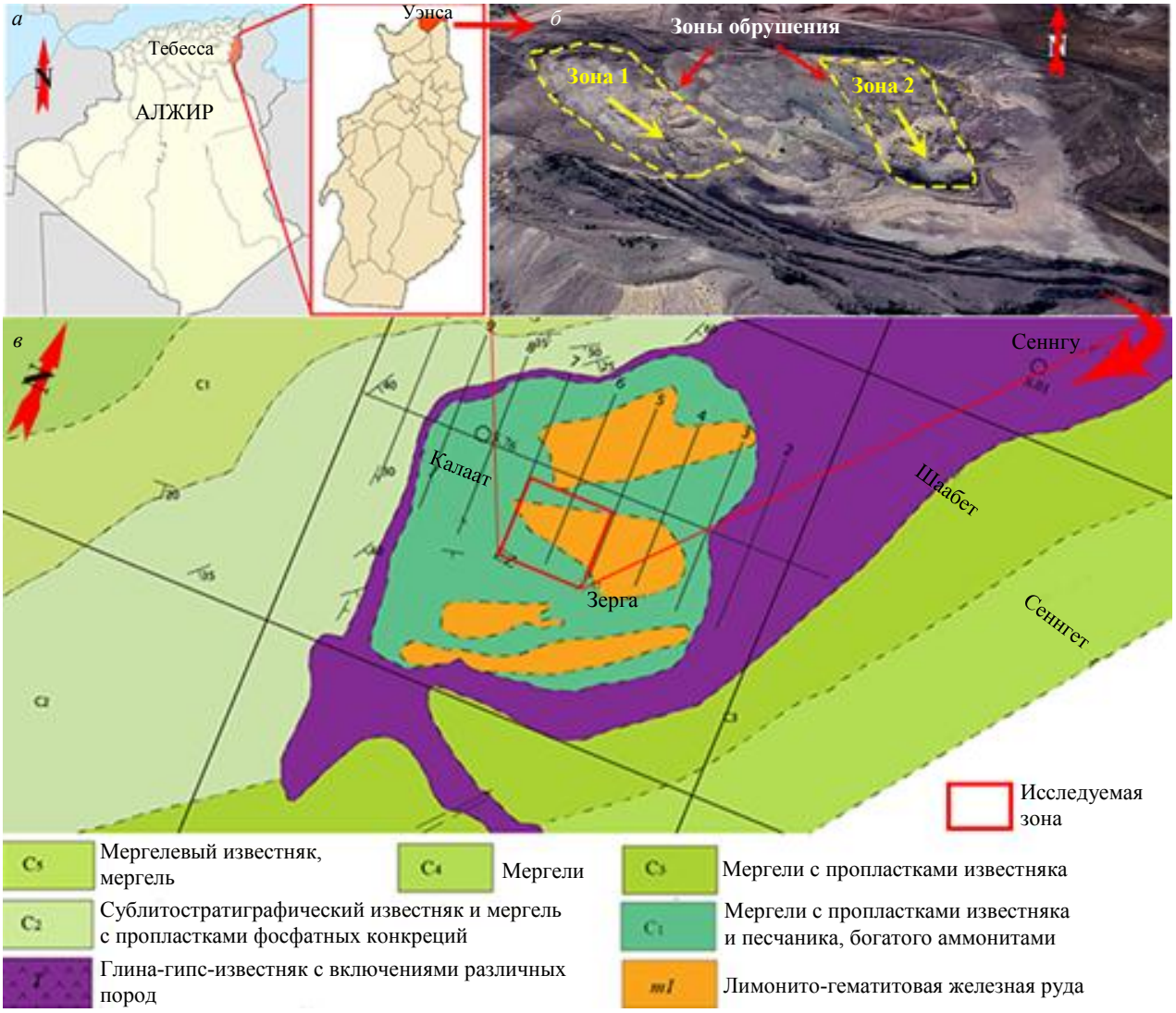


Рис.1. Расположение (*а*), поверхность скольжения (*б*) и геологическая зона (*в*) железорудного рудника Зерга-Уэнса

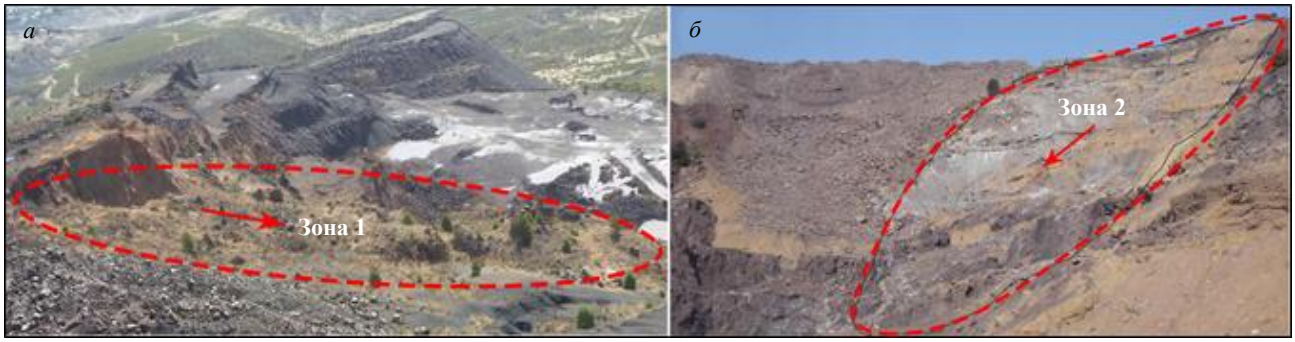


Рис.2. Геологический разрез исследуемых зон после обрушения: зона 1 (*а*), зона 2 (*б*)

В регионе, где среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, гидрогеологическая динамика имеет решающее значение. Кроме того, недостаток воды в регионе Уэнса подчеркивает важность понимания и управления подземными водами, поскольку город Уэнса для удовлетворения своих потребностей в питьевой воде полагается на снабжение водой из водохранилища Айн-Далиа, расположенного около 60 км к северу. Все эти факторы в совокупности

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

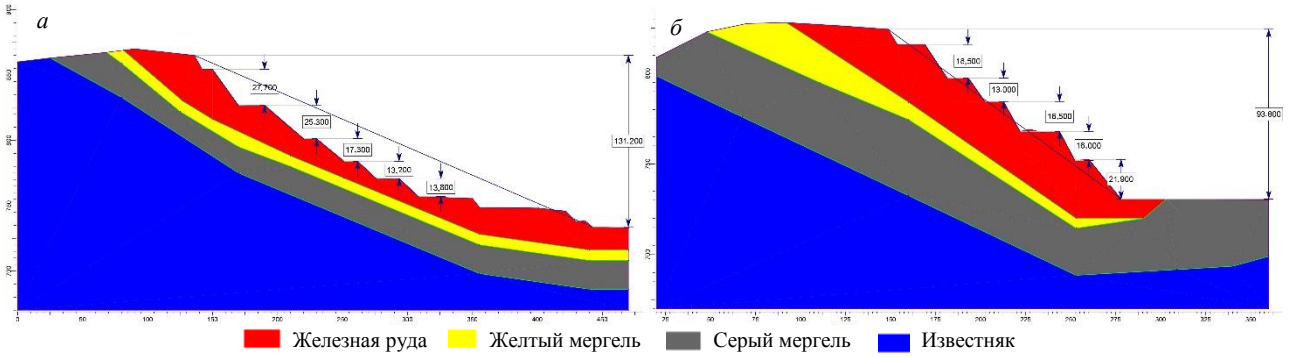


Рис.3. Геомеханическая модель для зоны 2 (*а*) и зоны 1 (*б*) в железорудном карьере Зерга-Уэнса

подчеркивают важную роль подземных вод в формировании устойчивости бортов железорудного карьера Уэнса, что делает их жизненно важным и как в горно-добывающей промышленности, так и в управлении окружающей средой.

Наблюдение за зоной обрушения и геомеханическая модель. На основании наблюдений за зоной обрушения, анализа слоев в геологическом разрезе (рис.2) и изучения его структурного состава, а также данных документации и результатов исследований можно выделить следующие характеристики поверхности разрушения:

• зона, подвергшаяся обрушению, состоит из эксплуатируемого слоя железной руды, смешанного с отложениями мергеля (желтого и серого);

• в двух зонах наблюдается перемещение значительного объема породы и сдвоенные уступы;

• находящиеся в основании железорудного слои пелитовой и глинистой формации нижнего танета менее устойчивы по сравнению с железорудным слоем;

• наличие поверхностей тектонических деформаций в мергелях и известняках.

В результате можно сделать вывод, что поверхность скольжения расположена на уровне слоя мергеля, а ее форма повторяет рельеф слоя.

На рис.3 представлена численная модель, объединяющая топографические и геологические данные. На основе топографических данных и данных буровых скважин, включая наблюдения на участке, определено, что геологическая формация участков, подверженных обрушению, на месторождении Зерга была сложена из четырех основных слоев: железной руды, желтого и серого мергеля и известняка.

Выбранный борт карьера смоделирован как сплошной материал в двухмерной плоскости с плоской деформацией, основанной на упруго-пластической формуле Кулона – Мора с расслоением при текучести. Численный анализ проводился с использованием конечно-элементной формулы, представленной в Phase2. Для определения коэффициента запаса для бортов карьера использовался метод снижения прочности на сдвиг или SSR. В табл.1 представлены свойства породного массива, использованные в анализе. Вдоль боковых сторон модели приняты граничные условия, при которых не допускается смещение в боковом направлении. В основании численной модели граница закреплена таким образом, что не допускается перемещение ни в одном из направлений.

Таблица 1

Геомеханические свойства пород

Порода	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Объемный вес сухих пород $\gamma_{сух}$, кН/м^3	Модуль Юнга $E_{пор}$, МПа	Сцепление C, МПа	Угол внутреннего трения φ, град	Дилатансия ψ, град	Коэффициент Пуассона ν
Железная руда	14,53	29,33	1822	0,199	25,9	0	0,3
Известняк	34,36	26,09	6548,8	0,332	30,7	0,7	0,3
Желтый мергель	13,11	24,71	784,9	0,166	21,6	0	0,28
Серый мергель	11,47	25,95	677,1	0,128	18,9	0	0,28

Обсуждение возможных причин обрушения. Эффективное управление устойчивостью бортов карьера при открытой разработке месторождений требует глубокого понимания потенциальных факторов, вызывающих обрушение бортов, в том числе гидрологических и гидрогеологических

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587
© Ф.Бельгелиль, М.Фредж, А.Саадун, Р.Букарм, 2024

условий, геометрических параметров (высоты и угла откоса борта), а также динамических эффектов, вызванных землетрясениями или взрывными работами. В данном исследовании гидрологические и гидрогеологические факторы не приняты во внимание из-за преимущественно засушливого характера района железорудного рудника Уэнса, в частности участка Зерга. Засушливость района железорудного рудника Уэнса, особенно на участке Зерга, подтверждается отсутствием значительных водоносных горизонтов.

Учитывая динамические эффекты от землетрясений и взрывных работ, карта сейсмического районирования, составленная в соответствии с алжирскими сейсмическими правилами RPA99/Version 2003, относит провинцию Тебесса, включая район проводимых исследований, к сейсмической зоне 1. Эта классификация подразумевает, что сейсмические волны, связанные с землетрясениями в этом регионе, слабы и незначительно влияют на устойчивость бортов карьера. Поэтому сейсмические факторы не рассматривались как существенные, способствующие разрушению бортов. Однако взрывные работы являются важным фактором, поскольку являются основным способом отбойки на карьере Уэнса. Использование взрывчатых веществ при взрывных работах создает вибрации, которые воздействуют на массив горных пород, нарушая целостность и ослабляя его сопротивление сжатию. Следовательно, вероятность спровоцировать обрушение борта посредством этого механизма становится решающим фактором в данном исследовании, подчеркивая важность оценки и смягчения воздействия взрывных работ на устойчивость бортов карьера при проведении горных работ.

Обсуждение результатов. *Анализ устойчивости бортов при статическом и динамическом нагружениях.* С помощью МКЭ был проведен обратный анализ устойчивости бортов карьера в состоянии статического нагружения. Борта карьера смоделированы с помощью программного обеспечения Phase2 (рис.3). Для анализа был выбран критерий разрушения Кулона – Мора, а геомеханические параметры для каждого породного слоя приведены в табл.1. Метод снижения прочности на сдвиг позволяет определить коэффициент запаса для борта карьера, значение SRF в точке неустойчивости принимается за коэффициент запаса борта. Сначала для обоих участков в их естественном состоянии исследовалась устойчивость борта до начала отработки для определения устойчивости исходного массива горных пород. Затем была изучена устойчивость реконструированного борта после очистных работ при статическом и динамическом нагружении (рис.4).

Результаты анализа естественного состояния откоса борта показывают $K_з$ = 1,88 и $K_з$ = 2,05 для зон 1 и 2 соответственно (рис.4, *а*). Оба значения $K_з$ превышают 1,3. Это означает, что в статическом состоянии исходный массив пород устойчив и безопасен для отработки запасов железной руды в долгосрочной перспективе. Результат анализа реконструированного борта при статическом нагружении в зоне 1 показывает $K_з$ = 1,2, а максимальная деформация сдвига происходит в слоях мергеля, начиная с высотной отметки 828 м и заканчивая горизонтом 731 м (рис.4, *б*). В зоне 2 $K_з$ = 1,16, и максимальная деформация сдвига также происходит в слоях мергеля, образующих круговую поверхность, которая начинается от горизонта 868 до 757 м (рис.4, *б*). Согласно этим результатам, даже если оба значения $K_з$ больше единицы и теоретически борты карьера в обеих зонах кажутся устойчивыми, устойчивость близка к предельной, так как $K_з$ в статическом состоянии меньше 1,3, согласно R.John, S.Peter [11].

Факторы, приводящие к критическому состоянию, связаны с несоблюдением стандартов горных работ. Во-первых, концентрация горных работ в нижней части борта карьера привела к увеличению общего наклона. Это оказывает большее давление на слои мергеля, которые имеют слабое сцепление и угол внутреннего трения, повышая вероятность формирования поверхности скольжения, как показано на рис.3, *б*. Во-вторых, при несоблюдении алжирских норм высоты ската, которые устанавливают 15 м в качестве предела, высота ската некоторых уровней участка достигает более 27 м с углом наклона от 39 до 62°. Данные факторы доводят устойчивость склона до критического положения, однако не являются причинами оползня.

Поскольку при статическом нагружении борт находится в предельном состоянии, а факторы, спровоцировавшие обрушение, еще не найдены, исследовались другие факторы влияния. Вибрации, вызванные землетрясениями, и грунтовые воды не играют важной роли в обрушении борта, поскольку рассматриваемый участок ведения горных работ считается засушливым и несейсмичным без учета принятого способа отбойки – буровзрывной. Вибрации, возникающие при взрыве, исследованы с помощью метода конечных элементов с добавлением сейсмических коэффициентов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

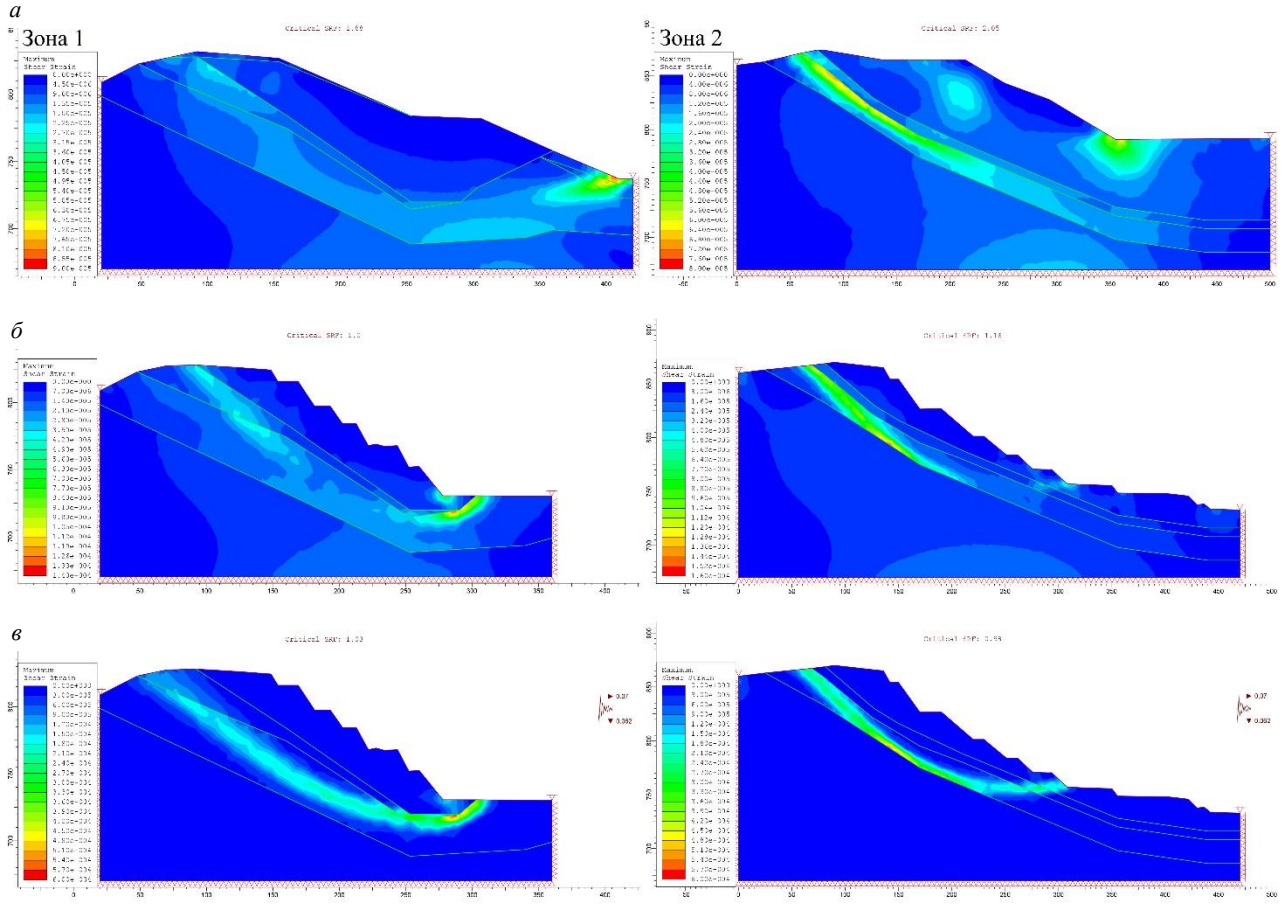


Рис.4. Максимальное напряжение сдвига и коэффициент запаса массива горных пород геологических зон до отработки (*а*), после отработки со статическим нагружением (*б*) и после отработки с динамическим нагружением (*в*)

Сейсмические коэффициенты представляют собой максимальную вибрацию в виде доли ускорения под действием силы тяжести. При их определении к каждому конечному элементу сетки прикладывается дополнительная сила. Вибрационные волны, возникающие в процессе взрывных работ, сочетают в себе горизонтальные и вертикальные. Согласно измерениям скорости и частоты волн, проведенным с помощью сейсмографа на исследуемой площадке, значения горизонтального и вертикального ускорений варьируются от 0,02 до 0,07g и от 0,02 до 0,062g, соответственно. Для определения возможной скорости ударной волны анализировались наибольшие значения.

Результаты анализа устойчивости склона под действием динамической нагрузки показывают значительное снижение SF в обеих зонах. Для зоны 1 $K_з$ = 1,03, а максимальная деформация сдвига происходит в слоях мергеля, формирующих поверхность скольжения, начиная с горизонта 828 и заканчивая горизонтом 731 (рис.4, *в*). Для зоны 2 $K_з$ = 0,98, и максимальная деформация сдвига также происходит в слоях мергеля, слагающих борт, начиная с горизонта 868 до горизонта 757 (рис.4, *в*).

Из результатов видно, что $K_з < 1$ для зоны 2 и $K_з \approx 1$ для зоны 1, что свидетельствует о неустойчивости борта, находящегося под действием динамической нагрузки. Обрушение будет происходить по поверхности, образованной максимальной деформацией сдвига, как показано на рис.4, *в*. Вибрации, возникающие при взрывных работах, и являются фактором, провоцирующим обрушение борта.

Анализ влияния взрывных работ на величину коэффициента запаса. Оценка влияния вибрации, создаваемой взрывными работами, на устойчивость откосов бортов очень важна для понимания степени возможного разрушения. Эта оценка может быть выполнена путем анализа влияния горизонтальных и вертикальных ускорений волн вибрации, создаваемых взрывами, на величину коэффициента

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587
© Ф.Бельгелиль, М.Фредж, А.Саадун, Р.Букарм, 2024

запаса. На этапе программного моделирования для обеих зон горизонтальное и вертикальное ускорения изменяются равномерно между минимальным и максимальным значениями. В то же время другие входные параметры остаются постоянными в своих основных значениях (рис.5).

Полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении коэффициента запаса с увеличением ускорения горизонтальной вибрации в обеих зонах. Вместе с тем, влияние увеличения ускорения вертикальной вибрации на снижение величины коэффициента запаса пренебрежимо мало. Горизонтальные вибрации, возникающие в процессе взрывных работ, являются основным параметром при анализе динамических нагрузок, оказывающим значительное влияние на коэффициент запаса и, соответственно, на устойчивость откоса борта карьера. Из линейных графиков следует, что устойчивость борта будет находиться в предельном состоянии, если значение горизонтальных вибраций достигнет или превысит 0,044g для зоны 1 и 0,024g – для зоны 2.

Решения предотвращения обрушения бортов. Исследование показывает, что обрушение борта провоцируют взрывные вибрации, создаваемые при взрывных работах. Их воздействие на устойчивость борта карьера может быть серьезным, поэтому контроль и качественный мониторинг взрывных работ очень важен для поддержания устойчивости бортов. Но в данном случае взрывные работы вызвали обрушение только потому, что при статическом нагружении борт находился в предельном состоянии, как утверждают R.John, S.Peter в руководстве по проектированию бортов карьера [11]. Факторы, влияющие на это предельное состояние, связаны с несоблюдением стандартов горных работ – концентрацией выемочных работ в области дна карьера. Кроме того, высота уступа, которая была адаптирована в исследуемом случае, считается критической, превышая 27 м на некоторых горизонтах. Таким образом, в этой части исследований для обеих зон предложен способ отработки начального борта в пять этапов, при котором соблюдается направление отработки сверху вниз, включая высоту уступа 15 м в соответствии с алжирскими нормами – с углом откоса уступа 70° (рис.6).

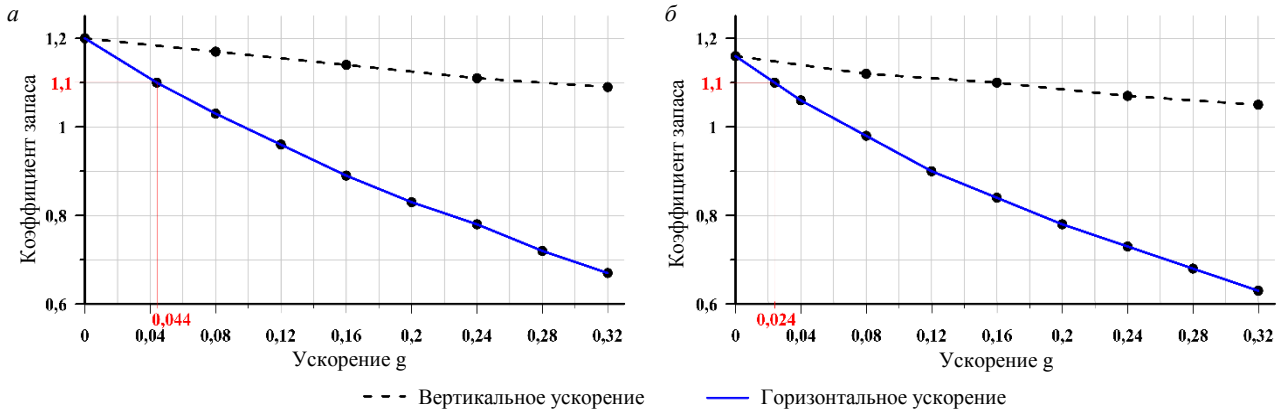


Рис.5. Линейные графики зависимости коэффициента запаса от вибрационного воздействия взрывных работ: *а* – зона 1; *б* – зона 2

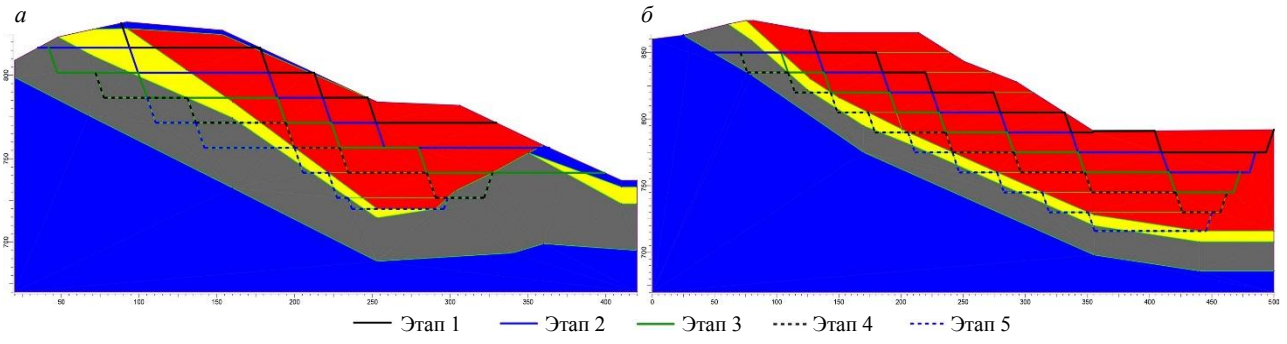


Рис.6. Порядок отработки геологических зон: *а* – зона 1; *б* – зона 2

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На рис.7 приведен анализ состояния борта на каждом этапе отработки при динамическом нагружении, которое послужило причиной обрушения борта.

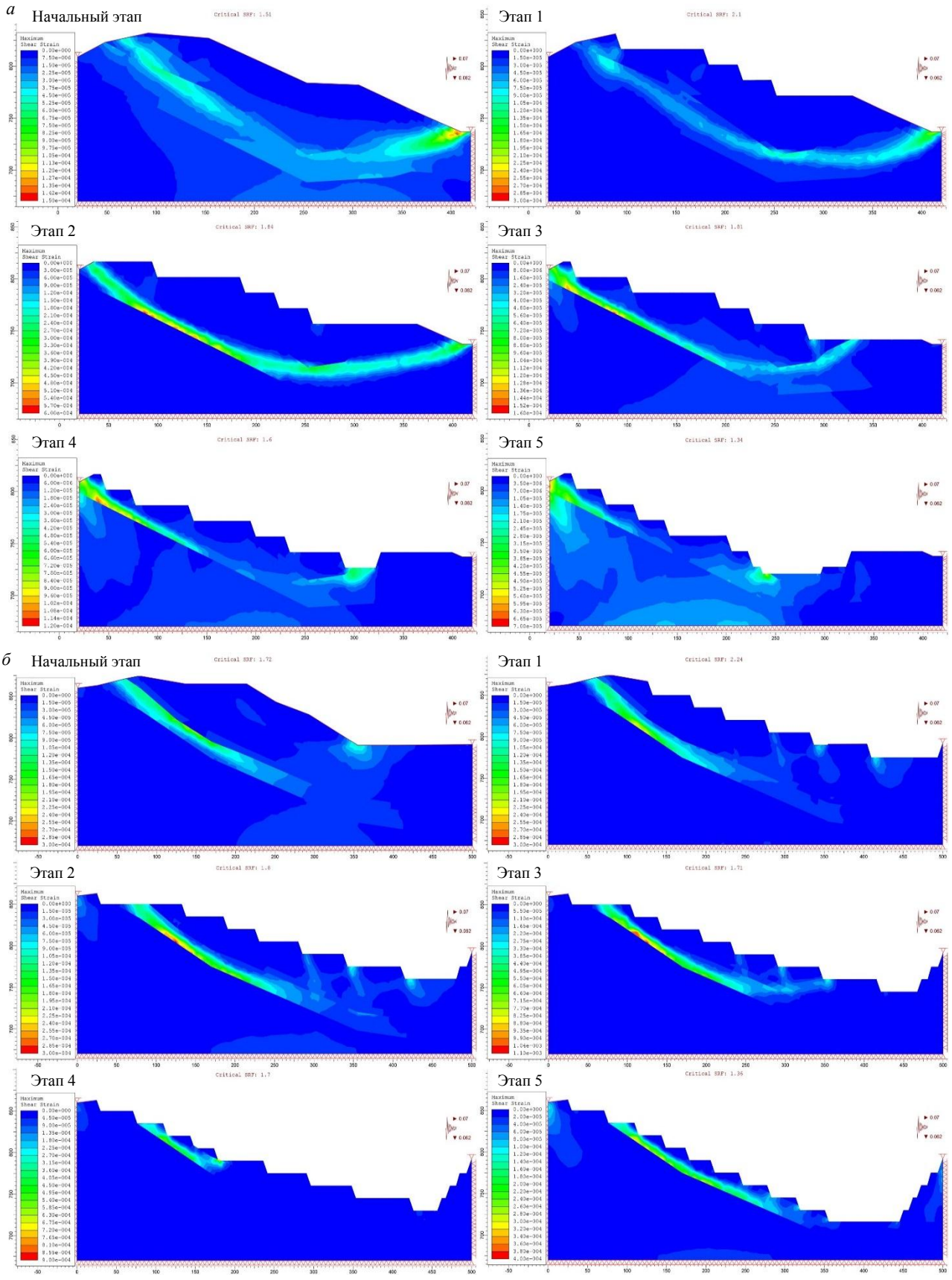


Рис.7. Максимальные напряжения сдвига и коэффициент запаса для каждого этапа отработки в зоне 1 (*а*) и зоне 2 (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587
© Ф.Бельгелиль, М.Фредж, А.Саадун, Р.Букарм, 2024

Результаты расчета коэффициента запаса для обеих зон сведены в табл.2. Начальный рельеф показал коэффициент запаса при динамической нагрузке 1,51 для зоны 1 и 1,72 для зоны 2. Поскольку эти значения превышают минимально допустимые ($K_з \geq 1{,}1$), начальный рельеф устойчив в долгосрочной перспективе.

Таблица 2

Коэффициент запаса для различных этапов отработки в условиях динамического нагружения

Зона	Начальный этап	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 4	Этап 5
Зона 1	1,51	2,1	1,84	1,81	1,6	1,34
Зона 2	1,72	2,24	1,8	1,71	1,7	1,36

На всех этапах отработки $K_з$ при динамическом нагружении обеих зон варьируется от 1,34 до 2,24. Эти величины также значительно превышают минимально допустимые при динамической нагрузке. Предлагаемый способ отработки обеспечивает безопасную добычу железной руды открытым способом без опасности обрушения борта карьера до полной отработки рудного тела. Кроме того, фактическая вибрация, возникающая при взрывных работах, является приемлемой и не представляет опасности для устойчивости борта.

Заключение. Приведен обратный анализ с использованием метода конечных элементов для исследования разрушения борта карьера на участке Зерга открытого железнорудного рудника Уэнса, Алжир. Первичное исследование устойчивости массива горных пород до начала горных работ показало, что $K_з$ в условиях статического нагружения для зон 1 и 2 составляет 1,88 и 2,05 соответственно. Оба значения превышают 1,3, что указывает на устойчивость для долгосрочной отработки месторождения. Однако последующий анализ реконструированного борта в условиях статического нагружения дает значения $K_з$, равные 1,2 и 1,16 для зон 1 и 2 соответственно, что указывает на предельное состояние борта, поскольку $K_з$ падает ниже 1,3.

К факторам, приводящим к подобному предельному состоянию, относятся отклонения от технологических норм добычи, в частности концентрация выемочных работ в нижней части борта карьера, увеличение общего угла откоса и повышенное давление на слои мергеля. Хотя высота уступа превышает алжирские нормы, это не является причиной обрушения.

Изучено влияние вибраций, вызванных взрывными работами, на устойчивость борта карьера с учетом сейсмических коэффициентов. Результаты демонстрируют значительное снижение $K_з$ (1,03 для зоны 1 и 0,98 для зоны 2), что свидетельствует о неустойчивости борта под действием динамической нагрузки. Горизонтальные вибрации заметно снижают $K_з$, в то время как вертикальные вибрации оказывают меньшее влияние.

Основной причиной обрушения борта являются вибрации от взрывных работ, что влечет за собой серьезные последствия для устойчивости борта карьера. Однако обрушение происходит только из-за существующего предельного состояния борта при статическом нагружении, которое связано с несоблюдением стандартов ведения горных работ. Анализ предложенного способа отработки в направлении сверху вниз показывает значения $K_з$ от 1,34 до 2,24 при динамическом нагружении, что подтверждает его безопасность для продолжительной эксплуатации месторождения.

Обрушение бортов зависит как от прямых, так и от косвенных факторов, включая вибрации от взрывных работ и несоблюдение стандартов ведения горных работ. Надлежащий мониторинг и контроль за взрывными работами имеет решающее значение для устойчивости бортов карьера, что подчеркивает необходимость строгого соблюдения норм ведения горных работ.

Для повышения устойчивости бортов необходимо строго придерживаться стандартов горных работ, уделяя особое внимание концентрации выемочных работ и высоте уступа. Обязательным является соблюдение соответствия применяемых способов отработки рекомендуемым нормам для снижения потенциального дестабилизирующего воздействия на борт карьера.

Необходимо внедрить комплексную систему геомеханического мониторинга для непрерывной оценки устойчивости бортов карьера, что позволит спрогнозировать дестабилизацию на ранней стадии и своевременно принять меры.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Необходимо разработать и внедрить эффективные методы управления взрывными работами, включающие оптимизацию использования взрывчатых веществ, мониторинг уровня вибрации и внедрение методов, позволяющих снизить влияние вибрации на устойчивость бортов карьера.

Рассматривается возможность применения предложенного способа отработки в направлении сверху вниз с соблюдением рекомендованных высот и углов откоса уступа, поскольку предлагаемый способ продемонстрировал повышенные коэффициенты запаса при динамическом нагружении, что имеет решающее значение для предотвращения возможного обрушения.

В предстоящих исследованиях необходимо использовать целостный подход к оценке устойчивости бортов карьера, включающий геологические, гидрологические и геомеханические факторы для повышения точности прогнозов и профилактических мер. Кроме того, изучение новых технологий, создание программ долгосрочного мониторинга, повышение осведомленности общественности, содействие совместным исследованиям и включение оценки воздействия на окружающую среду будут способствовать созданию безопасных методов разработки месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kolapo P., Oniyide G.O., Said K.O. et al.* An Overview of Slope Failure in Mining Operations // Mining. 2022. Vol. 2. Iss. 2. P. 350-384. DOI: 10.3390/mining2020019

2. *Bednarczyk Z.* Slope Stability Analysis for the Design of a New Lignite Open-Pit Mine // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 51-58. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.153

3. *Roy N., Kumar A., Rao K.S.* Stability Analysis of Failed Slope in Tindharia Region, West Bengal, India – A Case Study // Journal of the Geological Society of India. 2021. Vol. 97. Iss. 8. P. 887-892. DOI: 10.1007/s12594-021-1787-y

4. *Sarkar S., Pandit K., Dahiya N., Chandna P.* Quantified landslide hazard assessment based on finite element slope stability analysis for Uttarkashi–Gangnani Highway in Indian Himalayas // Natural Hazards. 2021. Vol. 106. Iss. 3. P. 1895-1914. DOI: 10.1007/s11069-021-04518-x

5. *Yaohui Gao, Yan Zhang, Chunchi Ma et al.* Failure process and stability analysis of landslides in Southwest China while considering rainfall and supporting conditions // Frontiers in Environmental Science. 2023. Vol. 10. № 1084151. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1084151

6. *Obregon C., Mitri H.* Probabilistic approach for open pit bench slope stability analysis – A mine case study // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 629-640. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.017

7. *Mojtahedi S.F.F., Tabatabaee S., Ghoroqi M. et al.* A novel probabilistic simulation approach for forecasting the safety factor of slopes: a case study // Engineering with Computers. 2019. Vol. 35. Iss. 2. P. 637-646. DOI: 10.1007/s00366-018-0623-5

8. *Shuai Li, Zeming Zhao, Boyi Hu et al.* Hazard Classification and Stability Analysis of High and Steep Slopes from Underground to Open-Pit Mining // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Iss. 18. № 11679. DOI: 10.3390/ijerph191811679

9. *Xiaojie Yang, Zhenli Hao, Gaotong Ma, Gan Li.* Research on Slope Stability Evaluation Based on Improved Set Pair Analysis Method: A Case of Tonglvshan Open-Pit Mine // Shock and Vibration. 2021. Vol. 2021. № 6713581. DOI: 10.1155/2021/6713581

10. *Shiferaw H.M.* Study on the influence of slope height and angle on the factor of safety and shape of failure of slopes based on strength reduction method of analysis // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2021. Vol. 10. 31 p. DOI: 10.1186/s43088-021-00115-w

11. *Wesseloo J., Read J.* Acceptance criteria / Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing, 2009. P. 221-235.

12. *Chaoqun Hou, Rongjian Zhang, Yongxin Li et al.* Comparisons of Safety Factors for Slope in Nonlinear Soils // KSCE Journal of Civil Engineering. 2021. Vol. 25. Iss. 10. P. 3737-3749. DOI: 10.1007/s12205-021-0298-0

13. *Yiyun Yang.* Grey Relational Analysis on Influencing Factors of Highway Slope Safety in Ankang Mountain Area // International Journal of Safety and Security Engineering. 2020. Vol. 10. № 5. P. 721-726. DOI: 10.18280/ijsse.100518

14. *Yunyong He, Ziyin Cai, Fuming Wang et al.* Numerical investigation on slope stability influenced by seismic load and discontinuity with a continuous-discontinuous method // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2023. Vol. 82. Iss. 3. № 70. DOI: 10.1007/s10064-023-03090-x

15. *Karthik A.V.R., Manideep R., Chavda J.T.* Sensitivity analysis of slope stability using finite element method // Innovative Infrastructure Solutions. 2022. Vol. 7. Iss. 2. № 184. DOI: 10.1007/s41062-022-00782-3

16. *Стетюха В.А., Железняк И.И.* Методика расчета на устойчивость эксплуатационной колонны из полимерного материала в многолетнемерзлых породах // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 22-28. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.22

17. *Fredj M., Hafsaoui A., Boukarm R. et al.* Numerical Modelling of Slope Stability in Open Pit Phosphate Mines, Algeria: A Comparative Study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 221. № 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012020

18. *Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др.* Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61-70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2

19. *Weijun Cen, Jiarui Luo, Jishun Yu, M. Shamin Rahman.* Slope Stability Analysis Using Genetic Simulated Annealing Algorithm in Conjunction with Finite Element Method // KSCE Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 24. Iss. 1. P. 30-37. DOI: 10.1007/s12205-020-2051-5

20. *Koca T.K., Koca M.Y.* Comparative analyses of finite element and limit-equilibrium methods for heavily fractured rock slopes // Journal of Earth System Science. 2020. Vol. 129. Iss. 1. № 49. DOI: 10.1007/s12040-019-1314-3

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

21. *Барях А.А., Девятков С.Ю., Денкевич Э.Т.* Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 13-20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11

22. *Fredj M., Hafsaoui A., Riheb H. et al.* Back-Analysis study on slope instability in an open pit mine (Algeria) // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. 2020. № 2. P. 24-29. DOI: 10.33271/nvngu/2020-2/024

23. *Gadri L., Hadji R., Zahri F. et al*. The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria // Arabian Journal of Geosciences. 2015. Vol. 8. Iss. 11. P. 8987-8997. DOI: 10.1007/s12517-015-1887-3

24. *Fredj M., Hafsaoui A., Khadri Y., Boukarm R.* Influence of the failure surface choice on the safety factor value during slope stability studies // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. 2018. № 3. P. 30-35. DOI: 10.29202/nvngu/2018-3/3

25. *Wei-Hai Yuan, Kang Liu, Wei Zhang et al.* Dynamic modeling of large deformation slope failure using smoothed particle finite element method // Landslides. 2020. Vol. 17. Iss. 7. P. 1591-1603. DOI: 10.1007/s10346-020-01375-w

26. *Ng S.M., Ismail M.A.M., Abustan I.* Back Analysis of Slope Failure Using Finite Element with Point Estimate Method (FEM-PEM) // Journal of Civil Engineering Research. 2014. Vol. 4. № 3A. P. 31-35. DOI: 10.5923/c.jce.201402.04

27. *Sakurai S.* Back Analysis in Rock Engineering. London: CRC Press, 2017. P. 240. DOI: 10.1201/9781315375168

28. *Xuesong Chu, Liang Li, Yung-ming Cheng.* Risk Assessment of Slope Failure Using Assumption of Maximum Area of Sliding Mass and Factor of Safety Equal to Unit // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. № 6268079. DOI: 10.1155/2019/6268079

29. *Saadoun A., Hafsaoui A., Khadri Y., Fredj M.* Numerical modelling of slope stability in Chouf Amar limestone quarry (M'sila, Algeria) // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. 2018. № 5. P. 24-29. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/3

30. *Qi Li, Yimin Wang, Kunbiao Zhang*. Failure Mechanism of Weak Rock Slopes considering Hydrological Conditions // KSCE Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 26. Iss. 2. P. 685-702. DOI: 10.1007/s12205-021-1198-z

31. *Benyoucef A.A., Gadri L., Hadji R, et al.* Mining operations and geotechnical issues in deep hard rock mining – case of Boukhadra iron mine // Geomatics, Land management and Landscape. 2022. № 4. P. 27-46. DOI: 10.15576/GLL/2022.4.27

32. *Saadoun A., Yilmaz I., Hafsaoui A. et al.* Slope Stability Study in Quarries by Different Approaches: Case Chouf Amar Quarry, Algeria // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 960. № 4. № 042026. DOI: 10.1088/1757-899X/960/4/042026

33. *Abdellah W.R., Hussein M.Y., Imbabi S.S.* Rock slope stability analysis using shear strength reduction technique (SSRT) – case histories // Mining of Mineral Deposits. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 16-24. DOI: 10.33271/mining14.02.016

34. *Sysala S., Hrubesova E., Michalec Z., Tschuchnigg F.* A rigorous variant of the shear strength reduction method and its geotechical applications / 16th International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS 2021), 7-10 September 2021, Barcelona, Spain. Scipedia, 2022. Vol. CT14 – Geomechanics. 8 p. DOI: 10.23967/complas.2021.007

35. *Fredj M., Boukarm R., Saadoun A., Nakache R.* Slopes stability studies excavated in a rock masses. Case of Ahmed El-Hadj quarry (Lafarge) / 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023, 3-9 July 2023, Albena, Bulgaria. STEF92 Technology. 2023. Vol. 23. Iss. 1.1. P. 233-242. DOI: 10.5593/sgem2023/1.1/s02.28

36. *Nie Zhibao, Zhang Zhihong, Zheng Hong*. Slope stability analysis using convergent strength reduction method // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2019. Vol. 108. P. 402-410. DOI: 10.1016/j.enganabound.2019.09.003

37. *Hussain G., Singh Y., Bhat G.M. et al.* Geotechnical Characterisation and Finite Element Analysis of Two Landslides along the National Highway 1-A (Ladakh Region, Jammu and Kashmir) // Journal of the Geological Society of India. 2019. Vol. 94. Iss. 1. P. 93-99. DOI: 10.1007/s12594-019-1272-z

38. *Yong Hong, Zhushan Shao, Guangbin Shi, Jiabao Liu*. Stability and Countermeasures for a Deposit Slope with Artificial Scarp: Numerical Analysis and Field Monitoring // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. № 8822080. DOI: 10.1155/2020/8822080

39. *Jiang Zhao, Xiangrui Duan, Lina Ma et al.* Importance sampling for system reliability analysis of soil slopes based on shear strength reduction // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2021. Vol. 15. Iss. 4. P. 287-298. DOI: 10.1080/17499518.2020.1780618

40. *Tianlong Zhang, Peng Zeng, Rafael Jimenez et al.* System reliability analysis of soil slopes using shear strength reduction and active-learning surrogate models // Arabian Journal of Geosciences. 2022. Vol. 15. Iss. 6. № 470. DOI: 10.1007/s12517-022-09718-8

41. *Aziz K., Sarkar S., Sahu P.* Geo-investigation and Slope Stability Analysis of Debris Slides along Ramban-Gool Road Network, Jammu and Kashmir, India // Journal of the Geological Society of India. 2023. Vol. 99. Iss. 7. P. 986-994. DOI: 10.1007/s12594-023-2419-5

42. *Zerzour O., Gadri L., Hadji et al*. Geostatistics-Based Method for Irregular Mineral Resource Estimation, in Ouenza Iron Mine, Northeastern Algeria // Geotechnical and Geological Engineering. 2021. Vol. 39. Iss. 5. P. 3337-3346. DOI: 10.1007/s10706-021-01695-1

43. *Zerzour O., Gadri L., Hadji R. et al.* Semi-variograms and kriging techniques in iron ore reserve categorization: application at Jebel Wenza deposit // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Iss. 16. № 820. DOI: 10.1007/s12517-020-05858-x

***Авторы*: Ф.Бельгелиль,** *аспирант, https://orcid.org/0009-0004-5231-6178* (*Университет Беджайя, технологический факультет, кафедра горного дела и геологии, Беджайя, Алжир*), **М.Фредж,** *д-р техн. наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой, mohamed.fredj@univ-bejaia.dz, https://orcid.org/0000-0002-0560-4941* (*Университет Беджайя, технологический факультет, кафедра горного дела и геологии, Беджайя, Алжир*), **А.Саадун,** *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0001-7860-6107* (*Университет Беджайя, технологический факультет, кафедра горного дела и геологии, Беджайя, Алжир*), **Р.Букарм,** *д-р гражданского строительства, профессор, https://orcid.org/0000-0002-9387-5812* (*Университет Беджайя, технологический факультет, Лаборатория строительной инженерии и архитектуры* (*LGCA*), *Беджайя, Алжир*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0