

УДК 622.015: 622.271.33

**УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЧИН ОБРУШЕНИЯ УЧАСТКА БОРТА КАРЬЕРА  
НА ОСНОВЕ РАДАРНОГО МОНИТОРИНГА  
И РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ**

**А. С. Калюжный, И. Ю. Розанов**

*Горный институт Кольского научного центра РАН,  
E-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Рассмотрен комплексный подход к определению возможных причин обрушения борта карьера “Железный” АО “Ковдорский ГОК”. Представлены данные радарного мониторинга IBIS, по которым спрогнозировано нарушение устойчивости. Выполнены и проанализированы расчеты устойчивости для данного участка борта. Показано, что при принятых прочностных свойствах могло произойти обрушение только верхнего уступа, так как коэффициент запаса его устойчивости менее 1.50. Потеря устойчивости могла быть следствием заниженных прочностных свойств прибортового массива в результате выветривания или возможного обводнения участка, либо обрушение могло произойти по разлому. Расположенное в непосредственной близости от обрушения промышленное здание не оказывало влияния на состояние устойчивости исследуемого участка. Даны рекомендации по установлению достоверных причин потери устойчивости.

*Карьер, борт, откос, Ковдорский ГОК, оценка устойчивости, коэффициент запаса устойчивости, поверхность ослабления, метод Моргенитерна – Прайса, SVSlope, радар IBIS*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240105  
EDN: HZAGLG

Для горных предприятий, ведущих добычу полезных ископаемых открытым способом, проблема поддержания устойчивости бортов карьеров является одной из основных. Актуальность проблемы возрастает при углублении и расширении карьерных выемок. Один из аспектов данной проблемы, позволяющий предлагать способы прогноза и профилактики элементов открытой геотехнологии, — подробный разбор случаев потери устойчивости с анализом факторов, влияющих на результат.

В карьере магнетит-апатитовых руд рудника “Железный” в 2022 г. произошло обрушение уступов. Данный участок борта карьера находился под контролем системы радарного мониторинга IBIS [1], что дало возможность спрогнозировать потерю устойчивости и минимизировать негативные последствия. Анализ кинематических параметров обрушения, а также визуальное обследование участка борта позволили определить тип события как оползень-обрушение, что характерно для верхних горизонтов карьера, сложенных моренными отложениями, корой выветривания и дезинтегрированными горными породами.

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ**

Для контроля устойчивого состояния уступов и участков бортов используются различные методы и средства мониторинга. Наиболее известные — системы наземного лазерного сканирования (НЛС) [2, 3] и системы, основанные на методе радарной интерферометрии [4].

Технологии НЛС эффективны в качестве средства картирования и изучения геологических структур, а также в создании цифровой модели рельефа. Так, на Шипуновском месторождении известняков сканер использовали для создания объемной цифровой модели и определения на ее основе структурно-иерархического строения геоблоков [5]. На карьере Северный ОАО «ЕВРАЗ КГОК» метод НЛС применялся для исследования трещиноватости массивов горных пород [6], и другие примеры [7, 8].

Кроме того, технологии НЛС часто применяют для наблюдения за оползневыми процессами. В [9] приводится обзор зарубежных публикаций и описываются примеры использования НЛС для изучения крупных оползней в городах Пишотта (Италия), Сешильенн (Франция), в Пуэрто-Рико и др. Существуют примеры использования НЛС и как средства мониторинга бортов карьеров, например Сибайского и Учалинского [10]. В [11] указывается о применении НЛС при мониторинге Султановского карьера, в [12] — бортов карьера Нюрбинский.

Эффективной технологической новинкой стало внедрение в практику мониторинга устойчивости бортов карьеров радарных технологий. Они успешно применяются на многих зарубежных и отечественных месторождениях — на золотом руднике Geita (Танзания), в карьере Palabora (Южная Африка), в Siilinjärvi (Финляндия), Sadiola Gold mine (Мали) и Jwaneng Diamond mine (Ботсвана), Kanmantoo Copper Mine (Австралия) Bingham-Canyon (США) и т. д. [13–16].

Измерения, выполняемые радаром, основаны на использовании эффекта наложения (интерференции) электромагнитных волн. Радар является источником электромагнитных волн радиодиапазона, излучает импульс с частотой 17.1–17.3 ГГц. Импульс частично поглощается средой и частично отражается по направлению к радару. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения информации о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала. Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз [17].

На рис. 1 показан принцип работы радара, где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — фазы до смещения и после смещения соответственно,  $d$  — смещение объекта мониторинга. Смещение определяется путем сопоставления фаз в направлении линии визирования, т. е. фактически проводится измерение не общего вектора смещения, а его компоненты (рис. 2).

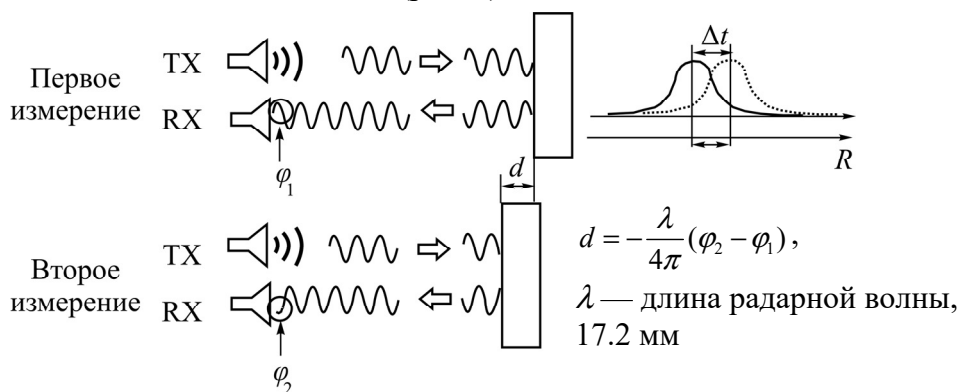


Рис. 1. Принцип работы радарной системы

Во время каждого измерения отражение радарного сигнала принимается от каждого пикселя. Это отражение дает информацию об амплитуде сигнала и фазе. Чем меньше размер пикселя, наложенного на модель объекта, тем более детально можно наблюдать за массивом горных пород.

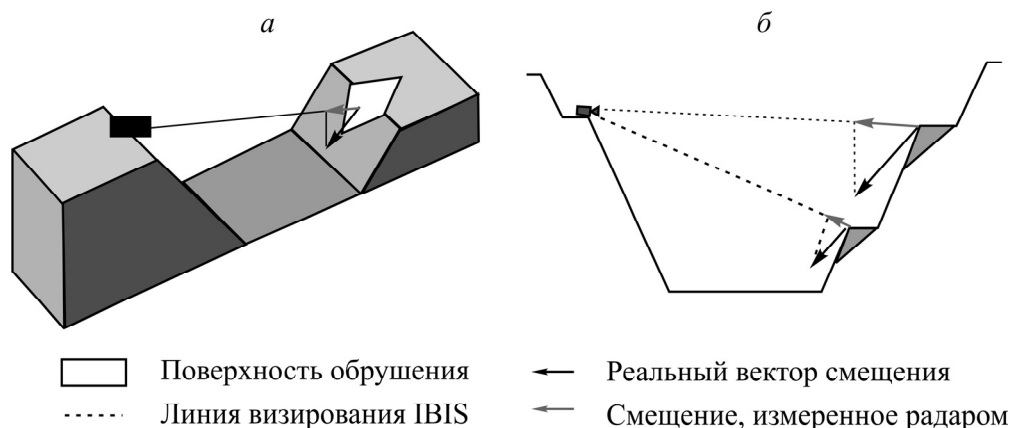


Рис. 2. Схема определения смещений радаром: *а* — в пространстве; *б* — в разрезе [17]

После выполнения интерферометрического анализа данные с радара передаются на компьютер со специализированным программным обеспечением, которое может строить графики накопленного за период наблюдений смещения, его скорости, ускорения и т. д. Кроме того, программное обеспечение позволяет настроить систему оповещения персонала о вероятном обрушении. Для этого необходимо определить критические значения кинематических параметров обрушений, характерных для условий отработки конкретного месторождения.

На предприятии АО «Ковдорский ГОК» для контроля поверхности уступов и борта карьера используются четыре радара: один стационарный IBIS FM и три мобильных радара IBIS ArcSAR. Дальность действия радара IBIS FM 10–4000 м. Размер пикселя 4.4 м на 0.75 м (при удалении на 1000 м) и 8.8 м на 0.75 м (при удалении на 2000 м). Рабочие температуры окружающей среды в контейнерном исполнении –50...+55° [18].

Мобильный радар IBIS ArcSAR имеет следующие характеристики: рабочая дальность до 5000 м; углы сканирования: горизонтальный 360°, вертикальный 120°; время сканирования при съемке 360° — 40 с; разрешение 10 млн пикселей на полный охват; рабочие температуры окружающей среды –50...+55°.

В настоящее время все участки борта карьера отслеживаются радарной системой мониторинга, за исключением глубоких горизонтов. На карьере «Железный» выполнены многолетние совместные исследования силами сотрудников геомеханической службы АО «Ковдорский ГОК» и отдела геомеханики ГоИ КНЦ РАН по установлению критической скорости развития обрушений, а также выявлению характера развития процесса разрушения по кинематическим составляющим [18].

В отличие от радарной съемки способы оценки устойчивости откосов, основанные на методах предельного равновесия, дают информацию о состоянии устойчивости как уже сформированных откосов в карьере, так и откосов на стадиях проектирования борта. Суть метода предельного равновесия заключается в учете и соотношении удерживающих сил к сдвигающим силам по наиболее напряженной поверхности ослабления. Полученное значение в результате отношения этих сил называется коэффициентом запаса устойчивости (КЗУ), который, в свою очередь, является критерием устойчивости откосов. Минимальное значение КЗУ, при котором откос устойчив, называется нормативно заданным значением ( $K_{ЗУ\text{норм}}$ ) и определяется в соответствии с разработанными и утвержденными в России [19] федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности [19, 30]. В приложении № 4 Правил содержится таблица нормативных значений коэффициента запаса устойчивости. Для уступов, находящихся в эксплуатации в скальных и полускальных породах,  $K_{ЗУ\text{норм}}$  составляет 1.50, для группы уступов или участка борта в тех же условиях  $K_{ЗУ\text{норм}}$  — 1.3.

Расчет значения коэффициента запаса устойчивости наиболее часто выполняют с помощью компьютеров и программных продуктов, в которые заложены алгоритмы, существенно упрощающие и ускоряющие операции по расчету. Помимо этого, они могут осуществлять расчеты сразу по нескольким вариантам метода предельного равновесия: Феллениуса, Бишопа, Спенсера, Ямбу, Morgenstern-Price, Сармы.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Восточный участок борта карьера рудника “Железный” АО “Ковдорский ГОК”, на котором в мае 2022 г. произошло нарушение устойчивости уступов гор. 258–202 м, был поставлен в проектное положение за 10 дней до его обрушения, при этом угол заоткоски уступов составлял 65–70°. По предварительной оценке, объем обрушения составил около 130 000 м<sup>3</sup>.

На рис. 3 приведена предварительная схема потерявшего устойчивость участка.

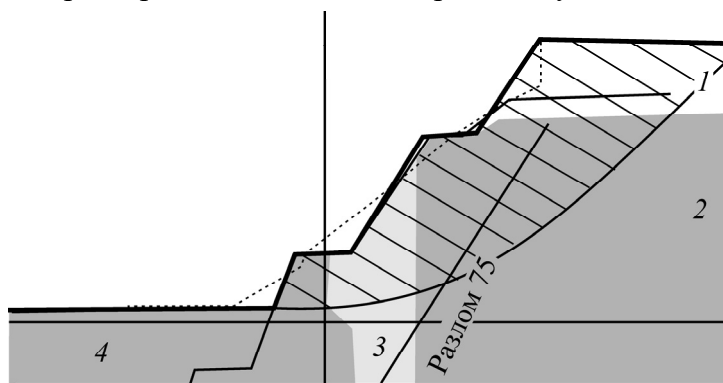


Рис. 3. Схема нарушения устойчивости уступов карьера рудника “Железный” АО “Ковдорский ГОК” (составлена Геотехнической службой): — положение уступов в момент постановки на конечный контур; — линия проектного контура; - - - линия профиля деформации на май 2022 г.; // — зона деформации; 1 — четвертичные отложения; 2 — ийолиты; 3 — пироксениты; 4 — фениты

*Анализ данных радарного наблюдения.* Для поиска причин произошедшего случая потери устойчивости проанализированы данные из установленного на противоположном участке борта карьера радара IBIS. Наибольший интерес представляют полученные в результате обработки графики смещений и их скорости в зависимости от времени (рис. 4).

Согласно выполненному анализу, сделан предварительный вывод о нетипичном характере развития процесса разрушения массива. Активное смещение участка борта началось приблизительно в 8:00 30 мая 2022 г., а около 12 ч скорость уже превысила критическое значение 2 мм/ч и продолжила нарастать. В 4:00 31 мая скорость достигла максимального значения, при этом на всем временном отрезке наблюдалось осыпание рыхлой горной массы средней интенсивности, однако обрушения не произошло и к 8:00 скорость приблизилась к нулю. По всей видимости, произошло зависание массива горных пород, что хорошо заметно на графике смещений с 4:00 до 8:00 31 мая 2022 г. в виде образовавшегося “плато”. После этого в 9:40 зафиксировано резкое обрушение массива. В дальнейшем на данном участке также отмечалось осыпание рыхлой горной массы средней интенсивности, о чем свидетельствуют высокие скорости смещения.

Подобные случаи зависания горных пород перед обрушением происходят достаточно редко и могут представлять значительную опасность, так как при замедлении скорости смещения массива практически до нуля можно ошибочно предположить, что процесс разрушения окончен.

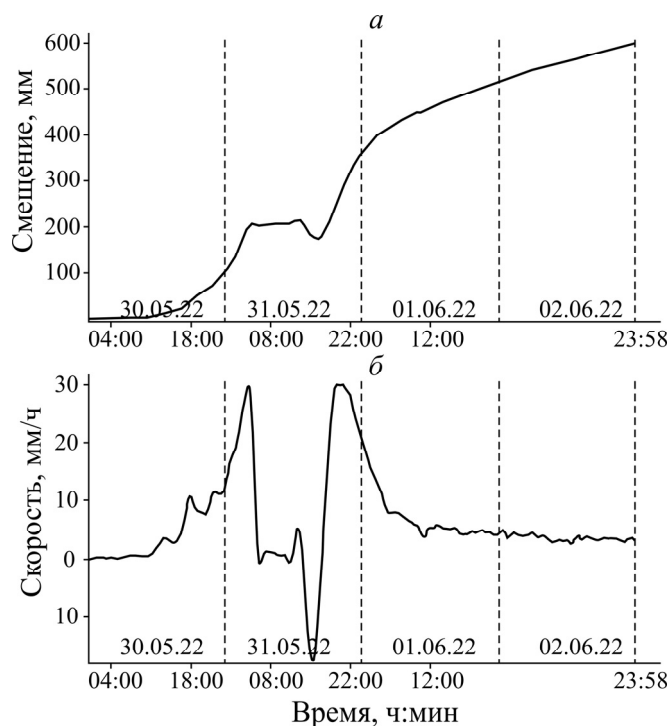


Рис. 4. Графики смещения (*а*) и скорости смещения (*б*) во времени обрушившегося участка борта карьера рудника “Железный”

Анализ кинематических параметров обрушения, а также визуальное обследование участка борта позволили определить тип события как оползень-обрушение. Длина по верхнему фронту составила около 115 м, по нижнему — 140 м, глубина развития примерно 35 м, объем обрушившейся горной массы 130 000 м<sup>3</sup>.

*Оценка устойчивости участка борта карьера.* Следующей задачей для выявления причин нарушения устойчивости участка борта стала оценка устойчивости методом предельного равновесия по варианту Моргенштерна–Прайса [21]. Данный метод широко используется для расчета устойчивости откосов бортов карьеров [22–27] и хорошо зарекомендовал себя применительно к карьерам Кольского региона [28]. Поиск поверхности ослабления выполнялся в автоматическом режиме (из множества возможных поверхностей ослабления определялась та, по которой расчет КЗУ был наименьшим) при круглоцилиндрической поверхности скольжения и вручную по разлому. Расчеты проводились в программном комплексе SV Office 2009 (пакет SVSlope).

Далее уточнялось нахождение разломов 62 и 75 по геолого-структурному плану (рис. 5).

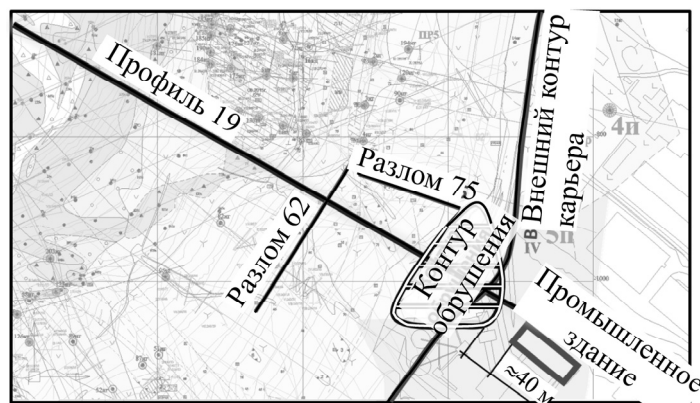


Рис. 5. План-схема участка борта карьера

Оказалось, что подсекающий разлом 75 проходит почти перпендикулярно направлению участка борта, тогда как разлом 62, в случае его экстраполяции, залегает под опасным углом в сторону выработанного пространства. В расчетную схему заложены физико-механические свойства согласно имеющимся литотипам (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Принятые физико-механические свойства для расчета устойчивости участка борта

Порода	Плотность $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град
Четвертичные отложения	2.22	0.010	20.5
Ийолиты	2.87	0.725	34
Пироксениты	3.02	0.727	37
Фениты	2.88	0.817	36
Разлом	2.10	0.050	18

Так как в непосредственной близости ( $\approx 40$  м) от потерявшего устойчивость участка уступа находится здание корпуса среднего и мелкого дробления (КСМД), то необходимо учесть и его влияние. Средняя высота здания 27 м, длина 96 м, средняя толщина стены 0.405 м, средняя плотность железобетона 2.6 т/м<sup>3</sup>. По периметру стен расположены колонны (16 шт.) длиной 1.5 м и высотой 27 м. Общая нагрузка от промышленного здания КСМД для расчетной схемы составляет 17 тыс. кН/м<sup>2</sup>. С учетом указанных данных сформирована расчетная схема участка борта карьера (рис. 6).

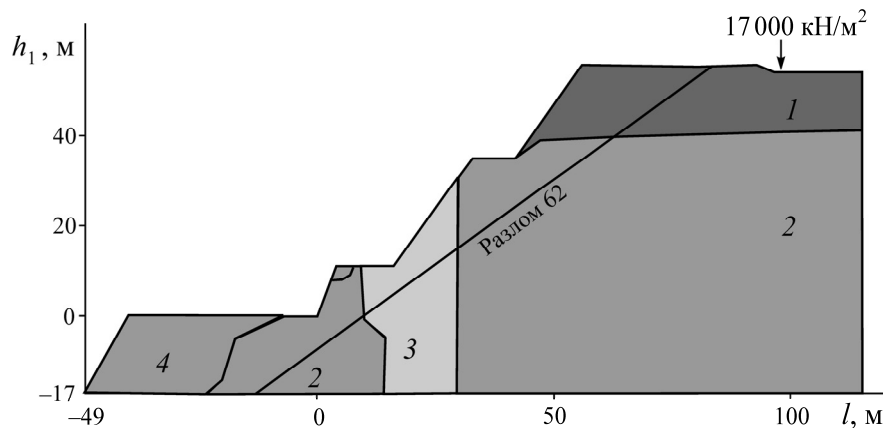


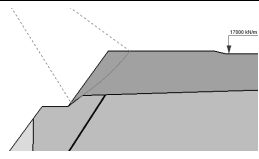
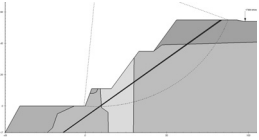
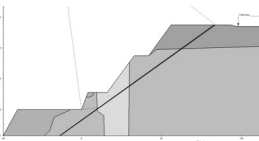
Рис. 6. Расчетная схема для оценки устойчивости обрушившегося участка борта; 1 — четвертичные отложения; 2 — ийолиты; 3 — пироксениты; 4 — фениты

При автоматическом поиске поверхности ослабления выделяется потенциально неустойчивый блок в верхнем уступе, сложенном четвертичными отложениями, с коэффициентом запаса устойчивости  $KЗУ$  0.62, что меньше  $KЗУ_{норм}$  и означает недостаточную его устойчивость. При учете нагрузки от здания поверхность ослабления не изменила свое положение, а  $KЗУ$  также составил 0.62.

По представленной схеме нарушения устойчивости участка борта (рис. 3) видно, что потеря устойчивости произошла не только верхнего уступа, но и участков бортов трех уступов. В таких условиях круглоцилиндрическая поверхность скольжения имеет  $KЗУ$  4.19 как с учетом нагрузки от здания, так и без учета нагрузки, что свидетельствует об устойчивом состоянии участка борта. Поскольку разлом 62 в случае его экстраполяции залегает под опасным углом, его влияние тоже учитывалась. При построении поверхности ослабления по разлому расчет показал, что минимальное значение  $KЗУ$  составляет 1.58 с учетом и без учета нагрузки от здания, что больше нормативно заданного значения.

Результаты оценки устойчивости исследуемого участка борта приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Обобщенные результаты оценки устойчивости

Расчетная схема	КЗУ с учетом и без учета нагрузки от здания	Состояние	Условие расчета	Параметры расчетного участка
	0.62	Неустойчивое	Круглоцилиндрическая поверхность, верхний уступ в коре выветривания	Угол откоса уступа 58°, высота 20 м
	4.19	Устойчивое	Круглоцилиндрическая поверхность, участок борта	Угол борта 43°, высота 56 м
	1.58	Устойчивое	По разлому 62, участок борта	Угол борта 43°, высота 56 м

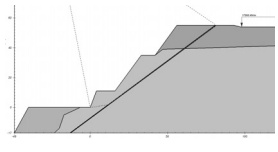
Полученные результаты оценки устойчивости показывают, что при существующих геологических и структурно-геологических условиях потеря устойчивости возможна только одного верхнего уступа, тогда как при поиске поверхности ослабления в пределах участка борта значение КЗУ больше КЗУ<sub>норм</sub>, что говорит об устойчивом его состоянии.

Визуальный осмотр места обрушения (до и после события) свидетельствует о том, что средний и нижний уступы потерявшего устойчивость борта сложены сильно трещиноватыми породами, что в некоторой степени противоречит принятым в расчетах физическим свойствам. Подобная ситуация в карьере наблюдалась ранее в районе здания рудничного дробильно-конвейерного комплекса, где из-за процессов выветривания прочностные характеристики пород прибортового участка заметно снизились. Наиболее вероятно, что на участке, где произошло обрушение в мае 2022 г., прочностные свойства имели более низкие характеристики в результате процессов выветривания. Для моделирования такой ситуации проведен дополнительный расчет устойчивости данного участка с учетом заниженных характеристик вмещающих пород, соответствующих частично дезинтегрированным породам месторождения ( $\gamma = 2.6 \text{ т/м}^3$ ,  $C = 0.08 \text{ МПа}$ ,  $\varphi = 24^\circ$ ).

В результате оценки устойчивости обрушившегося участка борта и учетом заниженных прочностных характеристик пород минимальное значение КЗУ по круглоцилиндрической поверхности ослабления составило 1.09, по разлому — 0.97, что является недостаточным для сохранения устойчивости (табл. 3).

Таким образом, потеря устойчивости участка борта карьера рудника “Железный” на гор. 258–202 м могла произойти только при условиях более низких прочностных свойств массива, чем это предполагалось, и/или при возможном обводнении участка борта. Обрушение могло произойти в том числе и по разлому. Находящееся примерно в 40 м здание КСМД не оказывало влияние на устойчивость и не могло привести к обрушению данного участка, даже предположив, что прочностные характеристики участка гораздо ниже принятых.

ТАБЛИЦА 3. Обобщенные результаты оценки устойчивости борта карьера с учетом заниженных характеристик массива пород

Расчетная схема	КЗУ с учетом и без учета нагрузки от здания	Состояние	Условие расчета	Параметры расчетного участка
	1.09	Предельное	Заниженные свойства массива, круглоцилиндрическая поверхность, участок борта	Угол борта 43°, высота 56 м
	0.97	Неустойчивое	Заниженные свойства массива, по разлому 62, участок борта	Угол борта 43°, высота 56 м

Для установления достоверных причин потери устойчивости рассматриваемого участка необходимо провести исследования по определению прочностных свойств горных пород в его пределах, уточнить параметры залегания различных литотипов и структурных нарушений, т. е. обновить инженерно-геологическую модель массива в данном районе. Это позволит в дальнейшем определить оптимальные параметры конструкций борта карьера. Целесообразно проводить периодическое обновление инженерно-геологической модели как всего прибортового массива пород в целом, так и наиболее значимых участков борта карьера в местах расположения ответственных объектов, таких как промышленные сооружения, транспортные коммуникации и т. п.

### ВЫВОДЫ

Анализ данных радарной съемки и вариантов оценки устойчивости позволил заключить, что наиболее вероятной причиной обрушения уступов на восточном участке борта карьера рудника “Железный” стало несоответствие конструкции прочностным характеристикам прибортового массива. Находящееся примерно в 40 м здание КСМД не оказывало влияние на устойчивость и не могло привести к обрушению данного участка, даже учитывая заниженные прочностные характеристики участка. Также можно предположить, что обрушение частично произошло по разлому, угол падения которого направлен в сторону выработанного пространства.

Комплексное применение оценок устойчивости откосов методом предельного равновесия и постоянного радарного мониторинга дает возможность определять и контролировать потенциально неустойчивые участки в режиме реального времени, а также выявлять возможные причины потери устойчивости, что повышает безопасность ведения горных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов И. Ю., Завьялов А. А. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника “Железный” (АО “Ковдорский ГОК”) // ГИАБ. — 2018. — № 7. — С. 40–46.
2. Armesto J., Ordonez C., Alejano L., and Arias P. Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes, *Geomorphology*, 2009, Vol. 106, Nos. 3–4. — P. 271–277.



3. **Jaboyedoff O. T., Blikra M., Derron L., and Metzger M. H. R.** Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning, *Natural Hazards and Earth System Sci.*, 2009.
4. **Barla A. C., Pieraccini M., and Antolini M. F.** Early warning monitoring of natural and engineered slopes with Ground-Based Synthetic-Aperture Radar, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2014, Vol. 48. — P. 235–246.
5. **Опарин В. Н., Середович В. А., Юшкин В. Ф., Иванов А. В., Прокопьева С. А.** Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 5. — С. 102–112.
6. **Рождественский В. Н., Панжин А. А., Пьянзин С. Р., Кочнев К. А.** Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования // Горн. журн. — 2014. — № 5. — С. 75–79.
7. **Лютак А. И.** Технология создания цифровых моделей карьеров с применением лазерных сканеров // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2014. — № 1. — С. 386–388.
8. **Дунаев В. А., Олейник О. В., Игнатенко И. М., Яницкий Е. Б.** Дистанционное определение элементов залегания трещин при натурном изучении деформаций уступов карьеров // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2011. — Вып. 1. — С. 107–111.
9. **Ляпишев К. М., Погорелов А. В., Шуляков Д. Ю.** Исследование оползней с применением технологии наземного лазерного сканирования // Геодезия, картография и маркшейдерия. — 2014. — С. 26–32.
10. **Кольцов П. В.** Методика безотражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов // Зап. Горн. ин-та. — 2012. — Т. 198. — С. 65–69.
11. **Желтышева О. Д., Ефремов Е. Ю.** Современные технологии мониторинга устойчивости бортов карьеров // Маркшейдерия и недропользование. — 2014. — № 5. — С. 53–66.
12. **Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Васильев И. В., Варламова Л. Д.** Мониторинг состояния бортов глубоких карьеров с применением технологии наземного лазерного сканирования // Горн. журн. — 2016. — № 9. — С. 37–39.
13. **Dyke G. P.** Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali — a case study, *World Gold Conf. 2009, The Southern African Institute Min. and Metallurgy*, 2009. — P. 169–176.
14. **Severin E., Eberhardt S., and Ngidi A.** Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations: *Proc. 3<sup>rd</sup> CANUS Rock Mech. Symp., Toronto*, 2009. — P. 214–225.
15. **Ramsden F., Coli N., Benedetti A. I., Falomi A., Leoni L. and Michelini A.** Effective use of slope monitoring radar to predict a slope failure at Jwaneng Mine Botswana, *Proc. 2015 Int. Symp. on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Eng., The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg*, 2015. — P. 162–179.
16. **Hutchison B. J., Naude S., and Howarth J.** Management of a toppling failure wall collapse at the Kambantoo coper mine in South Australia, *Proc. 2015 Int. Symp. on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg*, 2015. — P. 81–98.
17. **Исмагилов Р. И., Захаров А. Г., Бадтиев Б. П., Сенин Н. В., Павлович А. А., Свириденко А. С.** Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа // Горн. пром-сть. — 2020. — № 3. — С. 84–90.
18. **Розанов И. Ю., Ковалев Д. А.** Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера “Железный” АО “Ковдорский ГОК” // ГИАБ. — 2022. — № 12-1. — С. 122–133.

19. Макаров А. Б., Ливинский И. С., Спирин В. И., Павлович А. А. Управление устойчивостью бортов карьеров как основа обеспечения ответа на глобальные вызовы // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 3. — С. 188–202.
20. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов” Приказ от 13.11.2020 № 439.
21. Krahn J., Price V. E., and Morgenstern N. R. Slope stability computer program for Morgenstern — Price method of analysis, University of Alberta, Edmonton, Alta, 1971, Vol. 14.
22. Yang S., Su L., Zhang C., Li C., and Hu B. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall, Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao, J. Civil Env. Eng., 2020, Vol. 42, No. 4. — P. 19–27.
23. Kumar V., Himanshu N., and Burman A. Rock slope analysis with nonlinear hoek–brown criterion incorporating equivalent Mohr–Coulomb parameters, Geotech. Geol. Eng., 2019, Vol. 37, No. 6. — P. 4741–4757.
24. Mhaske S., Kapoor I., Pathak K., and Kayet N. Slope stability analysis of the overburden dump of meghahatuburu iron ore mines in singhbhum region of India, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 2020. — P. 3591–3605.
25. Guidelines for open pit slope design, Editors: J. Read, P. Stacey, Australia, 2010.
26. Bushira K. M., Gebregiorgis Y. B., Verma R. K., and Sheng Z. Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road, Ethiopia Modeling Earth Systems Env., 2018, Vol. 4, No. 2. — P. 591–600.
27. 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.
28. Калюжный А. С. Анализ результатов оценки устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета // ГИАБ. — 2021. — № 10. — С. 123–133.

*Поступила в редакцию 04/VII 2023*

*После доработки 19/I 2024*

*Принята к публикации 24/I 2024*