

Влияние статической нагрузки от горнотранспортного оборудования на устойчивость уступов, расположенных в скальных породах

А.С. Калюжный ✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ a.kalyuzhny@ksc.ru

Резюме: Большинство предприятий, обрабатывающих месторождение открытым способом, при приближении борта карьера к конечному положению или снижении производительности сталкиваются с проблемами укрупнения бортов карьеров. Основной задачей при увеличении угла наклона борта является определение его устойчивости. Одним из способов укрупнения борта карьеров является увеличение угла откоса слагающих борт уступов. Устойчивость уступа определяется прежде всего его физическими свойствами и структурной нерешённостью. Чем выше прочностные свойства пород, тем более крутым может быть угол откоса, сформированного в этих породах уступа. В «Правилах обеспечения устойчивости...» предусмотрена возможность учета нагрузок от оборудования при оценке устойчивости, однако данная возможность предусмотрена для расчёта устойчивости уступов карьеров и разрезов, сложенных полускальными и дисперсными породами, отвалов, формируемых из глинистых или полускальных пород и (или) из смеси глинистых и скальных пород. В то же время представляет интерес оценить влияние статической нагрузки от размещенного горнотранспортного оборудования, находящегося в неподвижном состоянии, на устойчивость уступов, расположенных в скальных породах. Показано, что нагрузка от бульдозера, зачищающего бермы, оказывает влияние не более 6–7% на расстоянии примерно до 15 м от верхней бровки 30-метрового уступа с углом откоса 80° до края гусеницы, что в общем является незначительным для сохранения устойчивости уступа. Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости уступа с нагрузкой от карьерного самосвала БЕЛАЗ-75306 находится на расстоянии от 8 до 10 м от верхней бровки уступа до края колеса, то есть на этом расстоянии самосвал оказывает максимальное влияние. Примерно на 30 м от верхней бровки уступа автосамосвал уже не оказывает влияния на устойчивость уступа. Максимальное влияние автосамосвала на устойчивость составляет от 22 до 25%.

Ключевые слова: карьер, борт, откос, уступ, оценка устойчивости, коэффициент запаса устойчивости, поверхность ослабления, Моргенштерн–Прайс, SVSlope

Для цитирования: Калюжный А.С. Влияние статической нагрузки от горнотранспортного оборудования на устойчивость уступов, расположенных в скальных породах. *Горная промышленность*. 2023;(3):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-116-121>

Impact of static loading from mining equipment on the bench stability in hard rocks

A.S. Kalyuzhny ✉

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ a.kalyuzhny@ksc.ru

Abstract: Most of the enterprises applying open-pit mining method at deposits face challenges of pit wall steepening when approaching the pit wall to the final position or reducing productivity. The main task when increasing the angle of pit slope is to determine its stability. One of the ways to steepen the open-pit wall is to increase the slope angle of benches composing the open-pit wall.

The bench stability is primarily determined by its physical properties and structural uncertainty. The higher the strength properties of rocks, the steeper the slope angle formed in these rocks can be.

The "Rules of stability..." provide for the possible accounting the loads from mining equipment when assessing the stability, but this possibility is provided for the calculation of bench stability of open-pits and cuts, formed by semi-hard and dispersed rocks, dumps formed from clay or semi-hard rocks and (or) from a mixture of clay and hard rocks. At the same time, it is of interest to assess the impact of static loading from the located mining transport equipment in a stationary state on the stability of the benches located in hard rocks.

It is shown that the load from the track dozer scraping the berms has an impact of no more than 6-7% for a distance of about 15 m from the top crest of a 30-meter long bench with a slope angle of 80° to the edge of the track, which is generally insignificant

for maintaining bench stability. The minimum value of the safety factor of the bench with the load from the BELAZ-75306 mining dump truck is at a distance of 8 to 10 m from the top crest to the edge of the wheel. That is, at this distance the mining dump truck has the maximum impact. At 30 m distance from the bench's top crest, mining dump truck has no impact on the bench stability. The maximum impact of the dump truck on the stability is 22 to 25%.

Keywords: open pit, open pit wall, slope, bench, stability assessment, safety factor, weakening surface, Morgenstern-Price, SVSlope

For citation: Kalyuzhny A.S. Impact of static loading from mining equipment on the bench stability in hard rocks. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-116-121>

Введение

Большинство предприятий, обрабатывающих месторождение открытым способом, рано или поздно сталкиваются с проблемами укручения бортов карьеров. Зачастую данные проблемы возникают из-за необходимости продления срока эксплуатации объекта открытых горных работ для сохранения рентабельности производства и, как следствие, самого предприятия.

Устойчивость уступа определяется прежде всего его физическими свойствами и структурной нарушенностью. Чем прочнее механические свойства пород, тем более крутым может быть сформирован угол откоса уступа в скальных породах в случае отсутствия в прибортовом массиве неблагоприятно ориентированных структурных нарушений.

Укручение бортов карьеров может происходить тремя основными способами: увеличением высоты уступа, уменьшением предохранительной бермы, увеличением углов откосов уступов. Первые два способа ограничиваются технологическими возможностями предприятия или нормативными требованиями, а третий – вертикальным углом откоса в 90°. Увеличение высоты, как и увеличение угла наклона откоса уступа, приводят к снижению устойчивости откоса, в результате чего формирование высоких и крутых уступов требует дополнительных обоснований, расчетов рисков [1] и контроля их устойчивости [2].

Помимо геометрических характеристик и свойств пород, слагающих массив, на устойчивость откосов также оказывают влияние внешние нагрузки: от зданий и сооружений, расположенных в непосредственной близости; от сейсмических событий природного и техногенного характера; от горнотранспортного оборудования и др. [3; 4].

В данной работе рассмотрена одна из актуальных проблем устойчивости уступов – влияние горнотранспортного оборудования – на примере участка прибортового массива пород Хибинской группы месторождений.

Вводные данные и методы

Разрез Хибинского массива в долинах зачастую сложен зональными уровнями горных пород с различной степенью дезинтеграции. Покрывающими породами являются моренные отложения, представляющие собой смесь обломков и измельченной породы различной фракции и состава, ниже залегают умеренно и значительно трещиноватые скальные породы, под которыми располагаются прочные слаботрещинчатые горные породы (рис. 1).

При проектировании борта карьера в таких условиях оценку устойчивости уступов целесообразно проводить в условиях каждого типа пород и подбирать параметры высоты и угла откоса уступа для конкретных условий.

Для дальнейшего рассмотрения поставленной проблемы выбраны следующие параметры уступа: высота – 30 м, угол откоса 80°. Так как прибортовой массив сложен множеством литологических разностей, то для упрощения

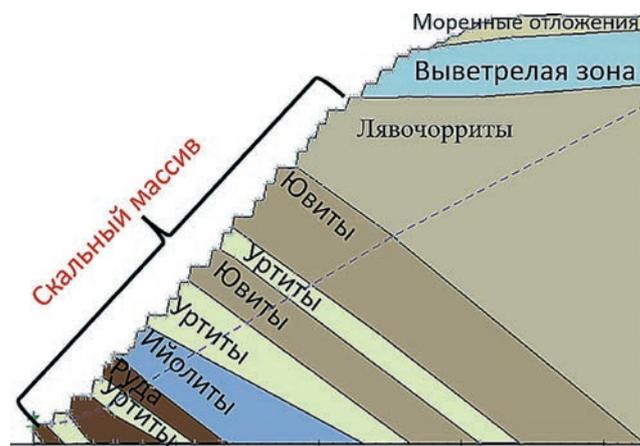


Рис. 1
Схема массива пород, слагающих прибортовой участок Хибинского массива

Fig. 1
A schematic view of the rocks composing the pit wall zone of the Khibiny massif

Таблица 1
Принятые физические свойства объединенных литотипов

Table 1
Assumed physical properties of the combined lithotypes

Наименование породы	Средняя плотность, кН/м ³	Угол внутреннего трения в массиве, град	Сцепление в массиве СМ, кПа
Выветрелая зона (ийолит-уртиты)	27,7	41,3	228
Ийолит	29,4	42,5	578
Уртит	26,9	43,5	566
Ювит	27,4	43,0	574
Лявочоррит	27,3	36,0	513
Руда	30,2	38	501

построения расчетных схем они были объединены в несколько литотипов. Свойства для каждого объединенного литотипа пород приведены в табл. 1.

В качестве горнотранспортного оборудования для оценки влияния на устойчивость уступов были выбраны бульдозер CAT D10T2 и карьерный самосвал БЕЛАЗ-75306.

Для учета нагрузки от бульдозера CAT D10T2 были приняты следующие параметры¹:

¹ Бульдозер Cat D10T2 технические характеристики. Режим доступа: <https://buldozertop.ru/buldozer-cat-d10t2-tehnicheskie-harakteristiki.html>

- эксплуатационная масса бульдозера с полным топливным баком – 70 171 кг;
- ширина колеи – 2,550 м;
- ширина гусеницы – 0,742 м;
- длина гусеницы – 3,872 м;
- нагрузка на 2 гусеницы – 688 кН/м²;
- нагрузка на 1 гусеницу – 344 кН/м²;
- нагрузка на длину гусеницы в 1 м – 112 кН/м².

Для учета нагрузки от карьерного самосвала БЕЛАЗ-75306 были приняты следующие параметры²:

- полная масса – 376 100 кг;
- распределение нагрузки: 33% на переднюю ось, 67% на заднюю ось;
- ширина колеи – 5,340 м;
- ширина покрывки – 1,225 м;
- пятно контакта ≈ 1 м;
- нагрузка на 1 колесо – 1235 кН/м².

Учет влияния бульдозера CAT D10T2 был выполнен следующим образом. К поверхности уступа были приложены две равно распределённые нагрузки 344 кН/м² на расстоянии друг от друга 2,550 м (рис. 2, а). Учет влияния самосвала БЕЛАЗ-75306 был выполнен аналогичным образом с приложением двух равно распределённых нагрузок в 1235 кН/м² на расстоянии 5,340 м друг от друга (рис. 2, б). Направление движения транспорта указано вдоль бермы уступа.

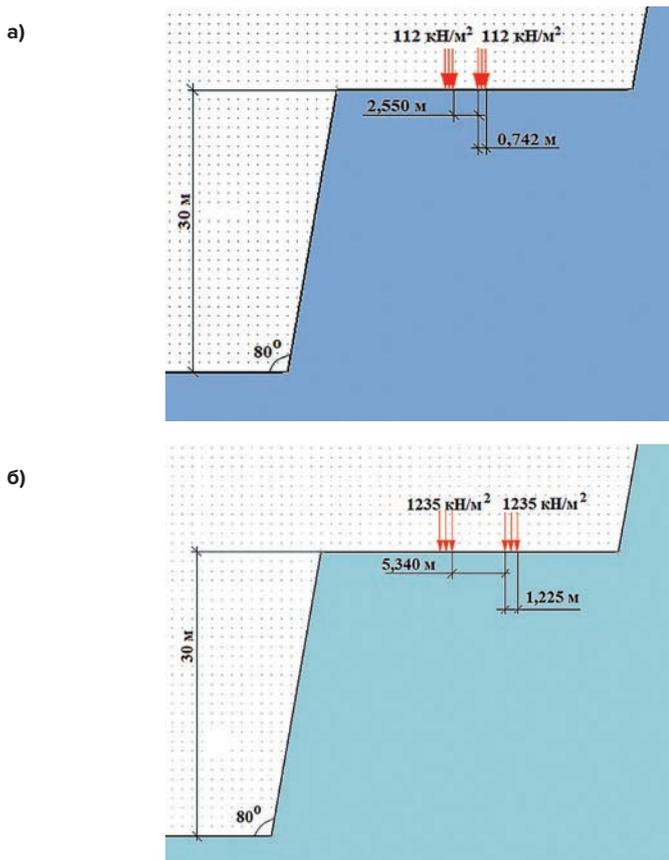


Рис. 2
Схема учета влияния горнотранспортного оборудования: а – бульдозер CAT D10T2; б – автосамосвал БЕЛАЗ-75306

Fig. 2
A schematic representation of the impact from mining transport equipment: а – CAT D10T2 dozer, б – BELAZ-75306 dump truck

В качестве метода расчета был выбран один из методов предельного равновесия – Morgenштерн–Прайса [5; 6]. Данный метод учитывает все три уравнения равновесия: уравнение сил в горизонтальном направлении, уравнение сил в вертикальном направлении, уравнение моментов равновесия, что отвечает существующим нормативным требованиям безопасности при ведении открытых горных работ³. Метод Morgenштерн–Прайса широко применяется как в отечественной, так и в зарубежной практике при оценке устойчивости откосов [7–12].

Участок массива, в котором смоделирован уступ, предполагался однородным, поэтому форма наиболее напряженной поверхности ослабления задавалась в виде круглоцилиндрической дуги, вход которой располагался на поверхности бермы уступа, а выход – на поверхности откоса уступа. Поиск наиболее напряженной поверхности ослабления выполнялся в автоматическом режиме путем выбора и расчета из множества возможных.

Расчет коэффициента запаса устойчивости выполнялся в программном комплексе SVOOffice пакет SVSlope. Данный программный комплекс предназначен для оценки устойчивости естественных откосов, откосов дамб, отвалов пустой породы, бортов карьеров и их уступов методом предельного равновесия в различных его вариантах (метод Феллениуса, Бишопа, Ямбу, Спенсера, Morgenштерн–Прайса, Сарма и др.). В данном программном комплексе есть возможность задавать уровень грунтовых вод, поровое давление, сейсмические нагрузки, прикладывать различные нагрузки к поверхностям смоделированного объекта и др. Применение такого рода программных комплексов позволяет более полно учитывать влияющие факторы, а также форму и положение поверхности ослабления [13].

Критерием оценки устойчивости уступа является коэффициент запаса устойчивости (КЗУ, или FOS – Factor Of Safety). Данный коэффициент представляет собой отношение суммы всех сил, удерживающих потенциально неустойчивый блок, ограниченный снаружи дневной поверхностью и наиболее напряженной поверхностью внутри массива, к сумме всех сдвигающих сил. При этом, если коэффициент запаса устойчивости меньше единицы, то это означает, что откос находится в неустойчивом состоянии; если коэффициент запаса равен единице, значит откос находится в предельном состоянии; если значение коэффициента запаса устойчивости находится в промежутке между единицей и нормативно заданным значением, то такое состояние называется недостаточно устойчивым; если коэффициент запаса устойчивости больше нормативно заданного, то блок находится в устойчивом состоянии.

Предельное значение коэффициента запаса устойчивости при выполнении данного исследования принято в соответствии с «Правилами обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»⁴, разработанными и утверждёнными в России в конце 2020 г. [14]. Согласно табл. 2 для уступов, расположенных в скальных и полускальных породах и находящихся в эксплуатации, значение коэффициента запаса устойчивости составляет 1,5.

³ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» Приказ от 13 ноября 2020 года № 439. Режим доступа: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf>

⁴ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» Приказ от 13 ноября 2020 года № 439. Режим доступа: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf>

² Карьерный самосвал БелАЗ-75306 грузоподъёмностью 220 тонн. Режим доступа: <https://www.mylbelaz.ru/upload/iblock/33f/33f7a006cc6b5b23ca45734ba261a467.pdf>

Таблица 2
Нормативные коэффициенты запаса устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов

Table 2
Normative safety factors for wall and bench stability in open-pit and strip mines

Характеристика откоса	Стадии доначала эксплуатации	Эксплуатация и техническое перевооружение	Проектирование доработки карьера (менее 3 лет), лет***	Для ответственных сооружений в чаше карьера	При безлюдной выемке
Полускальные и скальные породы					
Уступ*	1,50 (2,00)**	1,50	1,30	2,00	1,20
Участок борта, борт	1,30 (1,50)**	1,30	1,20	1,50	1,20
Песчаные и гравелистые породы					
Уступ, участок борта, борт	1,30	1,20	1,15	1,30	1,10
Глинистые породы					
Уступ	1,50	1,30	1,20	2,00	1,20
Участок борта, борт	1,40	1,30	1,20	1,50	1,20

Примечания: * для рабочих уступов промежуточного контура карьера во всех типах пород и сроком их стояния до 1 года при высоте не более 20 м допустимо использовать нормативный коэффициент запаса 1,2; при высоте более 20 м – 1,5;

** в скобках указано значение коэффициента запаса при использовании метода аналогий;

*** при использовании данных значений обязателен инструментальный мониторинг в режиме реального времени с покрытием рабочей зоны.

Источник: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» Приказ от 13 ноября 2020 года № 439. Режим доступа: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf>

Note: * It is acceptable to use a normative safety factor of 1.2 for working benches of the intermediate pit contour in all rock types and with a retention period of up to 1 year for heights not exceeding 20 m; and the safety factor of 1.5 for the heights exceeding 20 m

** The value in brackets indicates the safety factor when using the analogue approach

*** real-time instrumental monitoring of the whole working area must be carried out when using these values.

Source: Federal norms and rules in industrial safety "Rules for stability of the walls and benches of quarries, open pit mines and slopes of waste dumps", Order No. 439 dated November 13, 2020. Available at: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf>

Таблица 3
Значения КЗУ для уступа $H = 30$ м, $\Delta = 80^\circ$ с учетом влияния бульдозера CAT D10T2

Table 3
Safety factor values for a bench with $H = 30$ m and $\Delta = 80^\circ$ considering the impact of the CAT D10T2 dozer

Расстояние от края (верхн.бровки)	Ийолиты		Уртиты		Ювиты		Лявочорриты		Руда		Выветрелая зона	
	КЗУ	$\Delta, \%$	КЗУ	$\Delta, \%$	КЗУ	$\Delta, \%$	КЗУ	$\Delta, \%$	КЗУ	$\Delta, \%$	КЗУ	$\Delta, \%$
1 м	3,70	3,14	3,98	2,93	3,96	2,94	3,61	1,37	3,12	1,27	1,95	1,52
2 м	3,69	3,40	3,98	2,93	3,96	2,94	3,61	1,37	3,12	1,27	1,95	1,52
3 м	3,69	3,40	3,98	2,93	3,96	2,94	3,60	1,64	3,12	1,27	1,95	1,52
4 м	3,69	3,40	3,98	2,93	3,95	3,19	3,60	1,64	3,12	1,27	1,95	1,52
5 м	3,69	3,40	3,98	2,93	3,95	3,19	3,52	3,83	3,12	1,27	1,95	1,52
6 м	3,68	3,66	3,97	3,17	3,95	3,19	3,47	5,19	3,12	1,27	1,94	2,02
7 м	3,68	3,66	3,97	3,17	3,95	3,19	3,43	6,28	3,12	1,27	1,94	2,02
8 м	3,68	3,66	3,97	3,17	3,94	3,43	3,43	6,28	3,12	1,27	1,94	2,02
9 м	3,68	3,66	3,97	3,17	3,94	3,43	3,44	6,01	3,12	1,27	1,94	2,02
10 м	3,72	2,62	3,97	3,17	4,00	1,96	3,44	6,01	3,12	1,27	1,94	2,02
11 м	3,72	2,62	3,97	3,17	4,00	1,96	3,43	6,28	3,12	1,27	1,96	1,01
12 м	3,72	2,62	3,97	3,17	4,00	1,96	3,43	6,28	3,12	1,27	1,96	1,01
13 м	3,73	2,36	3,97	3,17	4,03	1,23	3,43	6,28	3,12	1,27	1,96	1,01
14 м	3,76	1,57	3,97	3,17	4,03	1,23	3,44	6,01	3,15	0,32	1,98	
15 м	3,75	1,83	3,97	3,17	4,03	1,23	3,43	6,28	3,16		1,98	
16 м	3,75	1,83	4,00	2,44	4,04	0,98	3,43	6,28	3,16		1,98	
17 м	3,79	0,79	4,00	2,44	4,04	0,98	3,57	2,46	3,16		1,98	
18 м	3,82		4,10		4,08		3,66		3,16		1,98	

Для оценки влияния горнотранспортного оборудования на устойчивость откоса уступа каждый расчет устойчивости был выполнен с шагом смещения транспорта в 1 м от верхней бровки уступа к нижней до тех пор, пока влияние не пропадет.

Обсуждение результатов

В результате выполненных исследований влияния горнотранспортного оборудования на устойчивость уступа высотой $H = 30$ м с углом откоса $\alpha = 80^\circ$ полученные значения коэффициентов запаса устойчивости для всех обобщенных линотипов пород были сведены в табл. 3 и 4.

Последняя строчка табл. 3 и 4 в столбцах КЗУ означает такие коэффициенты запаса устойчивости, при которых на уступе отсутствует горнотранспортная техника. Столбец « $\Delta, \%$ » означает изменение КЗУ уступа с нагрузкой от горнотранспортного оборудования относительно КЗУ уступа без внешней нагрузки. Закрашенные ячейки соответствуют минимальным значениям КЗУ и максимальным его изменениям.

Из табл. 3 видно, что для уступа в скальном массиве в условиях Хибинского массива высотой 30 м и углом откоса 80° при учете нагрузки от бульдозера CAT D10T2 минимальное значение КЗУ находится на расстоянии от 1 до 15 м

Таблица 4
Значения КЗУ для уступа $H = 30$ м, $\Delta = 80^\circ$ с учетом влияния карьерного автосамосвала БЕЛАЗ-75306

Table 4.
Safety factor values for a bench with $H = 30$ m and $\Delta = 80^\circ$ considering the impact of the BELAZ-75306 dump truck

Расстояние от края (верхн.бровки)	Ийолиты		Уртиты		Ювиты		Лявочорриты		Руда		Выветрелая зона	
	КЗУ	Δ, %	КЗУ	Δ, %	КЗУ	Δ, %	КЗУ	Δ, %	КЗУ	Δ, %	КЗУ	Δ, %
1 м	3,08	22,22	3,21	23,57	3,19	20,65	2,77	19,71	2,63	19,57	1,51	23,74
2 м	3,07	22,47	3,18	24,29	3,17	21,14	2,76	20,00	2,61	20,18	1,51	23,74
3 м	3,04	23,23	3,18	24,29	3,2	20,40	2,72	21,16	2,59	20,80	1,51	23,74
4 м	3,03	23,48	3,20	23,81	3,18	20,90	2,74	20,58	2,58	21,10	1,53	22,73
5 м	3,03	23,48	3,16	24,76	3,15	21,64	2,70	21,74	2,58	21,10	1,55	21,72
6 м	3,02	23,74	3,15	25,00	3,13	22,14	2,68	22,32	2,56	21,71	1,56	21,21
7 м	3,00	24,24	3,13	25,48	3,12	22,39	2,67	22,61	2,55	22,02	1,59	19,70
8 м	2,99	24,49	3,11	25,95	3,10	22,89	2,65	23,19	2,54	22,32	1,58	20,20
9 м	2,98	24,75	3,10	26,19	3,10	22,89	2,68	22,32	2,53	22,63	1,64	17,17
10 м	2,98	24,75	3,10	26,19	3,16	21,39	2,71	21,45	2,53	22,63	1,63	17,68
11 м	3,04	23,23	3,17	24,52	3,16	21,39	2,70	21,74	2,58	21,10	1,69	14,65
12 м	3,03	23,48	3,19	24,05	3,14	21,89	2,72	21,16	2,58	21,10	1,69	14,65
13 м	3,11	21,46	3,24	22,86	3,26	18,91	2,76	20,00	2,64	19,27	1,75	11,62
14 м	3,10	21,72	3,23	23,10	3,24	19,40	2,76	20,00	2,63	19,57	1,74	12,12
15 м	3,19	19,44	3,27	22,14	3,31	17,66	2,82	18,26	2,71	17,13	1,79	9,60
16 м	3,18	19,70	3,31	21,19	3,30	17,91	2,81	18,55	2,70	17,43	1,79	9,60
17 м	3,28	17,17	3,42	18,57	3,41	15,17	2,90	15,94	2,79	14,68	1,82	8,08
18 м	3,28	17,17	3,41	18,81	3,39	15,67	2,89	16,23	2,78	14,98	1,84	7,07
19 м	3,40	14,14	3,57	15,00	3,55	11,69	3,03	12,17	2,88	11,93	1,87	5,56
20 м	3,39	14,39	3,56	15,24	3,54	11,94	3,03	12,17	2,88	11,93	1,89	4,55
21 м	3,46	12,63	3,64	13,33	3,62	9,95	3,09	10,43	2,93	10,40	1,92	3,03
22 м	3,49	11,87	3,67	12,62	3,65	9,20	3,10	10,14	2,96	9,48	1,95	1,52
23 м	3,50	11,62	3,66	12,86	3,64	9,45	3,09	10,43	2,97	9,17	1,98	
24 м	3,57	9,85	3,75	10,71	3,73	7,21	3,18	7,83	3,02	7,65	1,98	
25 м	3,58	9,60	3,76	10,48	3,74	6,97	3,18	7,83	3,04	7,03	1,98	
26 м	3,64	8,08	3,83	8,81	3,81	5,22	3,25	5,80	3,09	5,50	1,98	
27 м	3,67	7,32	3,86	8,10	3,83	4,73	3,26	5,51	3,12	4,59	1,98	
28 м	3,73	5,81	3,94	6,19	3,90	2,99	3,32	3,77	3,16	3,36	1,98	
29 м	3,77	4,80	3,96	5,71	3,94	1,99	3,35	2,90	3,20	2,14	1,98	
30 м	3,83	3,28	4,03	4,05	4,00	0,50	3,40	1,45	3,25	0,61	1,98	
31 м	3,88	2,02	4,08	2,86	4,02		3,43	0,58	3,27		1,98	
32 м	3,93	0,76	4,14	1,43	4,02		3,45		3,27		1,98	
33 м	3,96		4,20		4,02		3,45		3,27		1,98	

от верхней бровки уступа, и примерно с 16 м от верхней бровки уступа бульдозер перестает оказывать влияние на устойчивость уступа. Максимальное влияние бульдозера на устойчивость составляет от 1,3 до 6,3%, что является несущественным.

Анализ табл. 4 показывает, что для уступа с нагрузкой от карьерного самосвала БЕЛАЗ-75306 минимальное значение КЗУ находится на расстоянии от 8 до 10 м от верхней бровки уступа. Примерно на 30 м от верхней бровки уступа автосамосвал не оказывает влияния на устойчивость уступа, а максимальное влияние нагрузки от автосамосвала на устойчивость составляет от 22,63 до 26,19%, что является существенным.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что для уступа, расположенного в скальном массиве Хибинской группы месторождений высотой 30 м и углом откоса 80° , нагрузка от бульдозера CAT D10T2, расположенного на берме уступа на расстоянии от 1 до 15 м от верхней бровки до края гусеницы, оказывает влияние не более $\approx 6-7\%$, что является незначительным для сохранения устойчивости. При тех же параметрах уступа груженный карьерный самосвал БЕЛАЗ-75306, статически расположенный на берме, способен оказывать существенное влияние на устойчивость уступа, снижая при этом коэффициент запаса до $\approx 25\%$ на расстоянии 8-10 м от верхней бровки до края колеса.

Список литературы

1. Спирин В.И., Ливинский И.С., Хормазаль Э. Оптимизация конструкций бортов карьеров на основе оценки рисков. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2019;(3):317–331.
2. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М., Панасенко И.Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020;(1):53–57. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
3. Павлович А.А. Особенности геомеханического обоснования устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов с учетом ФНП №439. *Маркшейдерский вестник*. 2022;(2):7–14.

4. Ушаков Д.К. Анализ факторов, влияющих на устойчивость скальных пород в бортах карьера. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2019;25(1):29–36. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-1-29-36>
5. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*. 1965;15(1):79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
6. Morgenstern N.R., Price V.E. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *Computer Journal*. 1967;9(4):388–393. <https://doi.org/10.1093/comjnl/9.4.388>
7. Yang S., Su L., Zhang C., Li C., Hu B. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall. *Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao / Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2020;42(4):19–27. (In Chinese).
8. Kumar V., Himanshu N., Burman A. Rock Slope Analysis with Nonlinear Hoek–Brown Criterion Incorporating Equivalent Mohr–Coulomb Parameters. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019;37(6):4741–4757. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00935-9>
9. Mhaske S., Kapoor I., Pathak K., Kayet N. Slope Stability Analysis of the Overburden Dump of Meghahatuburu Iron Ore Mines in Singhbhum Region of India. In: Lin J. (eds) *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2019*. IFEDC 2019. Singapore: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering; 2020, pp. 3591–3605. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2485-1_328
10. Read J., Stacey P. (eds) *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Australia; 2009. <https://doi.org/10.1071/9780643101104>
11. Bushira K.M., Gebregiorgis Y.B., Verma R.K., Sheng Z. Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road. *Ethiopia Modeling Earth Systems and Environment*. 2018;4(2):591–600. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0465-6>
12. 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). *Горный журнал*. 2018;(11):76–81. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.11.14>
13. Фоменко И.К., Горобцов Д.Н., Новгородова М.А., Сироткина О.Н. *Современные средства оценки устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов*. В кн.: Зырянов И.В., Бондаренко И.Ф. (ред.) Горнодобывающая промышленность в XX веке: вызовы и реальность: сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Мирный, 15–16 сентября 2021 г. Мирный: АЛРОСА; 2021. С. 29–32.
14. Макаров А.Б., Ливинский И.С., Спиринов В.И., Павлович А.А. Управление устойчивостью бортов карьеров как основа обеспечения ответа на глобальные вызовы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2021;(3):188–202. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-182-196>

References

1. Spirin V.I., Livinskiy I.S., Hormazabal E. Risk-based optimization of open pit slopes. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2019;(3):317–331. (In Russ.)
2. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kagan M.M., Panasenko I.G. Methodology of integrated stability monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
3. Pavlovich A.A. Features of geomechanical substantiation of stability of sides of quarries and slopes of dumps taking into account FNP No. 439. *Mine Surveying Bulletin*. 2022;(2):7–14. (In Russ.)
4. Ushakov D.K. Analysis of the factors influencing the sustainability of rock sciences in the sides of the career. *Transbaikal State University Journal*. 2019;25(1):29–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-1-29-36>
5. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*. 1965;15(1):79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
6. Morgenstern N.R., Price V.E. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *Computer Journal*. 1967;9(4):388–393. <https://doi.org/10.1093/comjnl/9.4.388>
7. Yang S., Su L., Zhang C., Li C., Hu B. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall. *Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao / Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2020;42(4):19–27. (In Chinese).
8. Kumar V., Himanshu N., Burman A. Rock Slope Analysis with Nonlinear Hoek–Brown Criterion Incorporating Equivalent Mohr–Coulomb Parameters. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019;37(6):4741–4757. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00935-9>
9. Mhaske S., Kapoor I., Pathak K., Kayet N. Slope Stability Analysis of the Overburden Dump of Meghahatuburu Iron Ore Mines in Singhbhum Region of India. In: Lin J. (eds) *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2019*. IFEDC 2019. Singapore: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering; 2020, pp. 3591–3605. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2485-1_328
10. Read J., Stacey P. (eds) *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Australia; 2009. <https://doi.org/10.1071/9780643101104>
11. Bushira K.M., Gebregiorgis Y.B., Verma R.K., Sheng Z. Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road. *Ethiopia Modeling Earth Systems and Environment*. 2018;4(2):591–600. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0465-6>
12. Yarg L.A., Fomenko I.K., Zhitinskaya O.M. Evaluation of slope optimization factors for long-term operating open pit mines (in terms of the Stoilensky iron ore deposit of the Kursk Magnetic Anomaly). *Gornyi Zhurnal*. 2018;(11):76–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.11.14>
13. Fomenko I.K., Gorobtsov D.N., Novgorodova M.A., Sirotkina O.N. State of the art tools for assessing the stability of open pit walls and dump slopes. In: Zyryanov I.V., Bondarenko I.F. (eds) *Mining Industry in the 20th Century: Challenges and reality: collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference, Mirnyi, September 15–16, 2021*. Mirnyi: ALROSA; 2021, pp. 29–32. (In Russ.)
14. Makarov A.B., Livinskiy I.S., Spirin V.I., Pavlovich A.A. PIT slope stability management as a basis for responding global challenges. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2021;(3):188–202. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-182-196>

Информация об авторе

Калюжный Антон Сергеевич – научный сотрудник отдела геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru

Information about the author

Anton S. Kalyuzhny – Research Associate, Department of Geomechanics, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.04.2023
Поступила после рецензирования: 05.05.2023
Принята к публикации: 10.05.2023

Article info

Received: 11.04.2023
Revised: 05.05.2023
Accepted: 14.05.2023