

УДК 622.271:551.34

ОБЩИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ НЕРАБОЧИХ БОРТОВ СВЕРХГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ АЛМАЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



И. В. ЗЫРЯНОВ¹,
зав. кафедрой, проф.,
д-р техн. наук



А. Н. АКИШЕВ²,
начальник отдела, канд. техн. наук,
akishevan@alrosa.ru



И. Б. БОКИЙ²,
зав. лабораторией, канд. физ.-мат. наук



Н. М. ШЕРСТНЮК²,
инженер 1-й категории

¹ Мирнинский политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, Мирный, Россия

² Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

Введение

Карьеры алмазородных месторождений Якутии являются одними из наиболее глубоких рудных карьеров России. Особенностью разработки таких карьеров, расположенных на территории Западной Якутии, является отстройка бортов карьера в зоне отрицательных температур, включающей в себя значительную толщу многолетнемерзлых пород, которая одновременно осложнена влиянием криогенных процессов на деформацию уступов.

В статье рассмотрены подходы к разработке и особенности ведения горных работ на алмазородных карьерах, обобщен опыт исследования геомеханической устойчивости бортов и уступов, приведены параметры нерабочих бортов и уступов карьеров.

Общая характеристика объекта исследования

Якутская алмазоносная провинция расположена в западной части Якутии. В нее входят основные алмазоносные районы – Мало-Ботуобинский, Алдыно-Алакитский, Муно-Тюнгский, Средне-Мархинский, на территории которых находятся кимберлитовые трубки «Удачная», «Юбилейная», «Мир», «Комсомольская» и др.

Горно-геологические и климатические особенности коренных алмазоносных месторождений Якутии создают уникальные по своей сложности условия для ведения горных работ, криолитозона оказывает непосредственное влияние на параметры нерабочих бортов карьеров.

Рассмотрены особенности разработки карьеров алмазородных месторождений, обобщен опыт исследования геомеханической устойчивости бортов и уступов, приведены параметры нерабочих бортов и уступов карьеров.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, сверхглубокие карьеры, геомеханическая модель, коэффициент структурного ослабления, прочность горных пород в талом и мерзлом состояниях.

DOI: 10.17580/gzh.2021.02.05

Основными особенностями кимберлитовых трубок Якутии являются сравнительно небольшие размеры и близкая к круговой или овальной форма в плане. Падение большинства кимберлитовых трубок близко к вертикальному, кимберлитовые тела с глубиной постепенно выклиниваются. Залегание вмещающих пород разрабатываемых кимберлитовых трубок близко к горизонтальному. Тектонические нарушения в основном благоприятно ориентированы к простиранию борта и имеют крутые углы падения.

Вмещающий массив алмазородных месторождений Якутии представлен полускальными породами с достаточно прочными разностями и горизонтальным залеганием. Следует отметить, что прочностные характеристики вмещающих пород месторождений одного кимберлитового поля статически однородны, что расширяет исходную рабочую базу для выбора расчетных значений прочностных свойств пород и повышает изученность месторождений.

Прочность, характеризующая сmerzшиеся контакты, выше прочности контактов талых, поэтому в условиях многолетней мерзлоты влияние контактов на устойчивость откосов будет сказываться меньше.

Сравнительный анализ прочностных характеристик горных пород в талом и мерзлом состояниях

В настоящее время наблюдается малое число работ, в которых исследуют прочностные характеристики многолетнемерзлых скальных и полускальных пород [1–6].

Изучение свойств многолетнемерзлых пород на объектах АК «АЛРОСА» начали проводить с 1961 г. с исследований прочностных свойств горных пород карьера трубки «Мир». Согласно полученным результатам при испытании мерзлых и талых мергелей и алевролитов, было установлено, что для алевролитов угол внутреннего трения не меняется в зависимости от мерзлого или талого состояния. Величина сцепления у талых образцов мергелей и алевролитов составляет 0,5–0,7 от сцепления мерзлых пород. По результатам исследований авторами был сделан вывод, что различие в прочностных свойствах талых и мерзлых образцов пород возникает при уровне их влажности не менее 5 % [3].

Более поздние исследования [1] показали, что даже незначительное изменение влажности скальных пород (в пределах 0,3–0,7 %) существенно влияет на их прочность. Отношение прочности на сжатие мерзлых и талых образцов диабазов при влажности 0,5–0,7 % составило 1,31, для глинистых известняков при влажности 1,5–1,6 % – 1,51.

В работе [4] также отмечено большое влияние влажности на прочность пород в мерзлом состоянии. Проведенные эксперименты показывали, что прочность пород в талом и мерзлом состоянии изменяется даже при незначительной влажности. Существенные изменения прочностных и деформационных характеристик наблюдаются при переходе пород из талого в мерзлое состояние при изменении температуры от 0 до –5 °С.

В работе [5] для плотных известняков предложена формула, связывающая прочность образцов на сжатие в мерзлом и талом состоянии для скальных и полускальных пород с влажностью до 5 %.

Из анализа результатов данных работ следуют следующие неоднозначные выводы: прочность скальных пород (диабазов) практически при нулевой влажности в мерзлом состоянии значительно выше, чем в талом; имеет место существенное линейное возрастание прочностных характеристик в мерзлом состоянии при изменении влажности в интервале от 1 до 5 %.

Наиболее полное исследование физико-механических свойств вмещающих пород было проведено для трубки «Ботубинская», по результатам обработки лабораторных исследований керновых проб геомеханических скважин № 1ГМ, 2ГМ и 4ГМ глубиной 600 м в 2012–2013 гг.

Материал проб – преимущественно карбонатные породы (доломиты, известняки) и алевролиты. Исследования проведены институтом «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО) совместно с Институтом горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН (ИГДС СО РАН). Для проведения механических испытаний было изготовлено около 5000 образцов. Лабораторные испытания по определению прочностных свойств в мерзлом состоянии вмещающих пород проводили в термокамере при температуре –4 °С.

Результаты исследований прочностных характеристик вмещающих пород трубки «Ботубинская» представлены в табл. 1.

Устойчивость уступов в процессе отработки месторождения

Анализ устойчивости уступов в процессе отработки алмазородных месторождений позволяет сформулировать следующие выводы.

1. По расчетам на предельное равновесие коэффициент запаса устойчивости откосов уступов (КЗУ), сложенных в полускальных породах при отсутствии неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, имеет значения, значительно превышающие допустимые. Однако под влиянием выветривания крутые откосы уступов подвергаются интенсивному осыпанию.

Основными факторами, провоцирующими деформации уступов карьера, являются: криогенное выветривание пород в откосах, интенсивность которого обусловлена водонасыщенностью породного массива и многократно повторяющимися циклами замораживания-оттаивания; оттаивание многолетнемерзлых пород

Таблица 1. Сравнительные значения пределов прочности на одноосное сжатие в мерзлом и талом состояниях литологических разностей горных пород по скважинам № 1ГМ, 2ГМ, 4ГМ

| Скважина | Порода | Предел прочности на сжатие, МПа | | Отношение σ_c^m/σ_c^t |
|----------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | | Талое состояние | Мерзлое состояние | |
| 1ГМ | Известняк | 67 | 78 | 1,16 |
| | Доломит, известняк, алевролит | 48,8 | 66 | 1,35 |
| | Алевролит | 34,17 | 38,41 | 1,12 |
| | Известняк, алевролит | 72 | 57 | 0,79 |
| | Мергель, алевролит, доломит | 55,28 | 57 | 1,03 |
| 2ГМ | Алевролит | 29,65 | 49 | 1,65 |
| | Известняк доломитистый | 56,72 | 87,06 | 1,54 |
| | Доломит м/з | 61,36 | 72 | 1,17 |
| | Известняк глинистый | 66,21 | 77 | 1,16 |
| | Мергель доломитистый | 33,03 | 41,5 | 1,26 |
| 4ГМ | Алевролит известковистый | 40,02 | 65,06 | 1,63 |
| | Алевролит | 55,64 | 60,27 | 1,08 |
| | Известняк глинистый, доломитистый | 57,54 | 93,32 | 1,62 |
| | Известняк | 48,56 | 63 | 1,30 |
| | Мергель и доломит | 43,63 | 63,73 | 1,46 |
| | Аргиллит известковистый | 49,2 | 67,1 | 1,36 |

в весенне-летний период года и подвижки элементарных блоков породы в связи с таянием цементирующего трещины ледяного слоя.

Прибортовой массив, подверженный влиянию сезонных циклов замораживания-оттаивания, теряет сцепление и превращается в дробленый материал заполнителя. Начало высыпания происходит в локальных местах, где потеря устойчивости наблюдается в виде вывала блока. В дальнейшем происходят осыпание откоса и его выколаживание. Расчетами установлено, что началу интенсивного высыпания предшествует падение сцепления по контакту поверхности разделения циклов замораживания-оттаивания до 2 т/м².

Можно выделить четыре схемы деформирования откоса уступа:

- выколаживание верхней части уступа за счет сработки верхней бермы, в результате чего уступ приобретает полигональную форму;
- сработка всей поверхности уступа, вплоть до поверхности осыпей на нижней бровке, практически равномерна по всему откосу;
- сработка откоса уступа, имеющая форму круглоцилиндрической поверхности, выходящей в откос уступа;
- переходная форма сработки, когда одновременно происходит сработка поверхности уступа и верхней его части с образованием полигональной формы.

Тем не менее эти явления нельзя квалифицировать как потерю уступов устойчивости, а следует рассматривать именно как вывалы дробленого рыхлого материала.

2. Изменение климата. С увеличением числа теплых дней и сезонных осадков в году происходили уменьшение прочностных показателей и интенсификация деформационных процессов: увеличение случаев локального вывалообразования и интенсивное осыпание откосов уступов.

3. Вмещающие карбонатные породы характеризуются неравномерным чередованием слоев известняков, доломитов средней прочности с весьма слабыми по прочности мергелями; прочностные свойства данных пород в талом состоянии значительно ниже, чем в мерзлом. В последние годы значительно увеличилось количество сезонных осадков, стоки воды в карьер и интенсивность выветривания массива. Вследствие этого по всему периметру карьера отмечается различной масштабно-осыпание обломков (вплоть до интенсивного вывалообразования) горных пород с поверхности откосов. Уступы, сложенные мергелями, в процессе циклов замораживания-оттаивания осыпаются с образованием нависающих козырьков.

4. Увеличение случаев локального вывалообразования и интенсивного осыпания откосов уступов обуславливает необходимость реализации предохранительных мер с формированием ловушек и предохранительного вала. В этом случае минимальная ширина транспортной бермы с учетом габаритов автотранспорта и ширины внешнего предохранительного вала составит 15 м.

6. Расчетный КЗУ уступов больше нормативного, однако среднегодовая сработка транспортной бермы на некоторых участках составляет порядка 0,5–1 м/год.

Выбор оптимальных параметров при проектировании сверхглубоких карьеров

Развитие научно-методических основ проектирования при сооружении сверхглубоких карьеров отражено в работах [7–16].

Оптимизация конструкций бортов карьеров должна в первую очередь основываться на максимальном использовании прочностных свойств мерзлых пород с разработкой новых подходов, расчетных схем и методик оценки устойчивости уступов и бортов нетрадиционной конструкции, вплоть до нерабочих уступов вертикального профиля.

Совершенствованию конструкции нерабочих бортов карьеров на месторождениях Якутии посвящены работы [4, 5, 17–20]. Уже в первых проектах разработки кимберлитовых месторождений Якутии на глубину 220–500 м при ограниченном объеме сведений о свойствах и условиях залегания горных пород были приняты достаточно большие значения угла откоса бортов карьеров: «Мир» – 35° (проект 1959 г.); «Айхал» – 35–40° (1964 г.); «Удачный» – 40° (1970 г.); «Юбилейный» – 38–41° (1985 г.). На последующих этапах проектирования одновременно с ростом проектной глубины карьеров углы откосов их бортов также увеличивались в результате уточнения инженерно-геологических условий месторождений, совершенствования методик расчета устойчивости карьерных откосов, внедрения новых типов конструкций бортов и способов постановки уступов в предельное положение.

В итоге были сокращены объемы вскрыши в проектных контурах карьеров «Удачный», «Юбилейный» и «Мир» более чем 150, 120 и 20 млн м³ соответственно.

В ходе эксплуатации карьеров «Мир», «Интернациональный», «Айхал», «Удачный» и др. был решен целый ряд вопросов, связанных с разработкой технологических схем постановки уступов в предельное положение и определением рациональных параметров БВР на заоткосных работах в различных горно-геологических условиях.

В настоящее время борта алмазодобывающих карьеров Якутии при большой высоте имеют значительную крутизну. Их постановку в предельное положение осуществляют сдвиганием и сраиванием рабочих уступов с применением контурного взрывания методом предварительного щелеобразования. В проектах последних лет (карьер «Удачный», трубки «Комсомольская», «Юбилейная») внедрение крутонаклонных схем вскрытия (20 %) и формирование нижних высоких нерабочих уступов (высотой до 60 м под углом 80°) позволили, по сравнению с традиционной схемой вскрытия (8 %), увеличить угол наклона нижнего участка нерабочего борта на 6–12°.

Геомеханическую модель прибортового массива строят, как правило, для решения определенной инженерной проблемы. Геомеханическая модель включает в себя структурную модель массива, гипотезу о возможном характере смещения или обрушения и необходимые (в соответствии с принятой гипотезой и выбранным методом анализа) прочностные параметры скального массива. Построение «общей» геомеханической модели массива, которая призвана отражать все системы трещин и особенности скального массива, лишено практического смысла. При разработке геомеханической модели исследуемого массива основной задачей является изучение механических свойств слагающих его пород как составных частей геолого-структурной модели. Механические свойства в различных зонах массива изучают с помощью натуральных и лабораторных испытаний.

Общезвестно, что структурно-геологические особенности, снижающие прочность и устойчивость откосов бортов карьеров в скальных породах, невозможно детально выявить на стадии проектирования.

На начальной стадии предполагается, что надежность геомеханической модели будет оценена на низком уровне достоверности. Модель строят на основе существующих отчетов и интерпретаций, основанных на доступных региональных данных в схожей геологической окружающей среде. Эти предварительные данные могут быть дополнены аэрофотоснимками региональной литологии и структуры и картографированием обнажения пород, выполненными во время маркшейдерских работ.

На уровне технико-экономического обоснования полагают, что надежность геомеханической модели будет оценена на разумном уровне достоверности. Места взятия проб будут расположены вблизи границ проектируемого карьера. Детальное изучение неблагоприятных для устойчивости откосов структурно-геологических элементов осуществляют в период строительства и эксплуатации.

Геомеханическая модель должна обеспечить объективную оценку при переходе от натуральных условий к расчетной схеме

с целью конструирования бортов с оптимальным профилем.

Рекомендуется соблюдать следующую последовательность при определении профиля борта карьера.

1. Определяют горизонты, на которых будут формировать уступы на предельном контуре. При этом необходимо предусмотреть возможность формирования на нижних горизонтах (одном или двух) сверхвысоких уступов.

2. Для каждого из рассматриваемых горизонтов определяют результирующий угол откоса уступа, обеспечивающий его устойчивость с необходимым коэффициентом запаса. При этом уступ на предельном контуре может иметь ломаный профиль.

3. Рассчитывают необходимую ширину берм между горизонтами. Если между горизонтами предусмотрена транспортная берма, то ближайшую предохранительную берму увеличивают на ее ширину.

4. Прорабатывают схему вскрытия нижней части борта карьера с использованием круто-наклонных съездов и высоких уступов с применением здесь специальных самосвалов с шарнирно-сочлененной рамой, а также бульдозеров и погрузчиков, оснащенных системой дистанционного управления.

5. Рассматривают схему отработки нижней (придонной) части карьера с использованием отсыпных съездов на расчетную высоту, обеспечивающую доработку всех временно оставленных целиков. В этом случае отстройку нерабочего борта ведут с промежуточной (расчетной) отметки (выше дна карьера).

6. Выполняют последовательную оценку устойчивости конструктивных элементов борта карьера. Один расчет осуществляют от нижнего горизонта поуступно вверх, а второй – с верхнего горизонта вниз.

7. В итоге получаем устойчивый с позиций геомеханики выпуклый профиль борта, имеющий предельно возможный угол наклона.

Параметры сверхглубоких карьеров

Рассмотренные подходы к выбору оптимальных параметров были применены при проектировании сверхглубоких карьеров, характеристики которых приведены в табл. 2, 3.

Основной расчетной характеристикой, определяющей параметры борта карьера, является коэффициент структурного ослабления, который отражает расчетную величину сцепления пород в массиве. Расчет сцепления пород в массиве по известной формуле [6] для глубоких карьеров не позволяет получить значения коэффициента структурного ослабления, определенные в результате проведения натуральных испытаний и обратных расчетов. На алмазоносных месторождениях натурные испытания проводили как при разведке месторождений в подземных разведочных

Таблица 2. Параметры бортов алмазорудных карьеров

| Карьер | Размеры карьера, м | Глубина карьера, м | | Угол откоса бортов, градус | |
|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|----------------------------|-------------|
| | | по проекту | фактическая | по проекту | фактический |
| «Мир» | 1170×1050 | 525 | 525 | 45–49 | 44–49 |
| «Айхал» | 1000×550 | 330 | 335 | 38–50 | 38–55 |
| «Интернациональный» | 620×560 | 315 | 315 | 46–48 | 46–48 |
| «Удачный» | 2000×1600 | 640 | 640 | 39–44 | 39–44 |
| «Сытыканский» | 900×700 | 435 | 435 | 37–51 | 39–55 |
| «Юбилейный» | 2000×1300 | 720 | 480 | 42–50 | 14–31 |
| «Комсомольский» | 600×580 | 460 | 428 | 52–56 | – |
| «Нюрбинский» | 1000×910 | 562 | 410 | 46–50 | – |
| «Ботубинский» | 1309×1034 | 580 | 158 | 49–51 | – |

Таблица 3. Параметры нерабочих уступов алмазорудных карьеров

| Карьер | Параметры нерабочих уступов | | | |
|---------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--------------|
| | Высота, м | Угол откоса, градус | ширина берм, м | |
| | | | предохранительных | транспортных |
| «Мир» | 30–45 | 60–80 | 10–15 | 17–24 |
| «Айхал» | 15–60 | 60–75 | 10–25 | 17–22 |
| «Интернациональный» | 25–45 | 70–80 | 10–15 | 20–27 |
| «Удачный» | 30, 45, 60 | 60–90 | 15–25 | 28–39 |
| «Сытыканский» | 12–45 | 60–80 | 12–20 | 14–20 |
| «Юбилейный» | 30, 45, 60 | 60–80 | 15–30 | 30 |
| «Комсомольский» | 30, 45, 50–70 | 75–80 | 12, 15 | 18–24 |
| «Нюрбинский» | 30, 45, 60 | 45–80 | 10–15 | 24–30 |

выработках, так и в бортах эксплуатируемых карьеров «Мир», «Юбилейный», «Удачный» и др. [4]. Правильность определения значений коэффициента структурного ослабления в пределах 0,085–0,11 подтверждают параметры нерабочих бортов карьеров глубиной 385–640 м при генеральных углах 38–55° (профиль нерабочих бортов, как правило, двух- или трехгранный с крутой нижней частью высотой 0,35–0,5 H с углом до 70°) и при средних прочностных характеристиках – условное сцепление 7,85–11,84 МПа, угол внутреннего трения 28,1–37,4°.

Выводы

Оптимизацию конструктивных параметров бортов глубоких карьеров необходимо осуществлять применительно к конкретным условиям каждого разрабатываемого месторождения.

2. Наблюдается значительное превышение прочностных свойств в мерзлом состоянии по сравнению с талым – при отношении $\sigma_c^m/\sigma_c^t > 1,5$ число подобных случаев составило порядка 50 % от общего числа испытаний. Максимальное отношение прочностных характеристик получено для алевролитов, мергелей и глинистых известняков.

3. При отсутствии неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления массива применение высоких уступов высотой 45 м под углами до 80° позволяет осуществлять формирование бортов глубоких карьеров (450–600 м) с углами откоса 45–55°.

4. Основными факторами, провоцирующими деформации уступов карьера, являются: криогенное выветривание пород


в откосах, интенсивность которого обусловлена водонасыщенностью породного массива и многократно повторяющимися циклами замораживания-оттаивания; оттаивание многолетнемерзлых пород в весенне-летний период года.

5. Прочностные характеристики вмещающих пород месторождений одного кимберлитового поля статически однородны ввиду горизонтального залегания, что повышает изученность месторождений и геомеханическую устойчивость бортов карьеров.

6. Максимальное использование естественной несущей способности горного массива (коэффициент структурного ослабления

массива 0,08–0,11) позволяет отстраивать оптимальные профили бортов карьеров, обеспечивающие минимальный объем вскрышных работ. Внедрение в схему вскрытия крутонаклонных съездов с продольным уклоном (20 %) позволяет увеличить угол наклона нерабочего борта карьера по сравнению с применением схемы вскрытия с традиционным продольным уклоном транспортных съездов (8 %) на 5°, что обеспечивает уменьшение объема вскрыши до 25 %. Применение высоких уступов позволяет увеличить угол наклона нерабочего борта карьера еще до 5°, снижение объема вскрышных работ составит дополнительно 5–15 %.

Библиографический список

1. Глазман Г. Р. Исследования деформаций откосов уступов, сложенных многолетнемерзлыми породами, и меры по их предотвращению: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1968. – 26 с.
2. Розенбаум М. А. Геомеханические основы управления горным давлением при разработке угольных пластов в зоне многолетней мерзлоты: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1996. – 363 с.
3. Ермаков И. И. Исследование устойчивости бортов карьеров круглой и овальной формы в условиях многолетнемерзлых пород (на примере карьера кимберлитовой трубки «Мир»): дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1965. – 150 с.
4. Козеев А. А., Изаксон В. Ю., Званарев Н. К. Термо- и геомеханика алмазных месторождений. – Новосибирск: Наука, 1995. – 243 с.
5. Методическое пособие по определению углов откосов уступов и углов наклона бортов карьеров, сложенных многолетнемерзлыми породами. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 106 с.
6. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб.: ВНИМИ, 1998. – 208 с.
7. Захаров В. Н., Рельникова М. В., Никифорова И. Л. Развитие научно-методических основ проектирования горнотехнических систем при открытой разработке месторождений // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск 37. Открытые горные работы в XXI веке: результаты, проблемы и перспективы развития-1. С. 13–26.
8. Зотеев В. Г., Зотеев О. В. О необходимости совершенствования нормативно-методической базы по геомеханическому обеспечению открытых горных работ // Горный журнал. 2010. № 1. С. 66–68.
9. Рельникова М. В., Зотеев О. В., Никифорова И. Л. Развитие нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов // Горная промышленность. 2018. № 3. С. 95–98.
10. Цибель С. В., Павлович А. А. Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горный журнал. 2017. № 7. С. 39–45. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.07
11. Жабко А. В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов // Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 4(40). С. 45–57.
12. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. – Collingwood: CSIRO Publishing, 2009. – 487 p.
13. Chaoyi Sun, Congxin Chen, Yun Zheng, Kaizong Xia, Wei Zhang. Topping Failure Analysis of Anti-Dip Bedding Rock Slopes Subjected to Crest Loads // International Journal of Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Vol. 12. No. 11. P. 685–693.
14. Yun Zheng, Congxin Chen, Tingting Liu, Kaizong Xia, Xiumin Liu. Stability analysis of rock slopes against sliding or flexural-topping failure // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018. No. 4. DOI: 10.1007/s10064-017-1062-z
15. Bar N., Barton N. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. Iss. 12. P. 3307–3322.
16. Azhari A., Ozbay U. Investigating the effect of earthquakes on open pit mine slopes // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. Vol. 100. P. 218–228.
17. Пустовойтова Т. К., Гурин А. Н., Казермазова С. В. Устойчивость откосов в массивах многолетнемерзлых пород // Труды ВНИМИ: сб. ст. – Л., 1980. С. 101–105.
18. Акишев А. Н., Бокий И. Б., Зырянов И. В. К вопросу развития геотехнологии открытой разработки алмазородных месторождений // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техноферной безопасности в условиях Северо-Востока России: сб. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 80-летию д-ра техн. наук, проф. Е. Н. Чemezova. – Якутск, 2018. С. 267–274.
19. Зырянов И. В., Акишев А. Н., Бокий И. Б., Бондаренко И. Ф. Инновации при проектировании алмазородных карьеров в криолитозоне // Горная промышленность. 2018. № 5. С. 66–69.
20. Акишев А. Н., Бокий И. Б. К вопросу о возможности увеличения угла наклона борта карьера в условиях криолитозоны // ГИАБ. 2014. № 8. С. 36–40. 

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 2, pp. 48–53
DOI: 10.17580/gzh.2021.02.05

General concept of determining the parameters of non-mining walls of ultra-deep diamond deposits development open pits

Information about authors

I. V. Zyryanov¹, Head of a Chair, Professor, Doctor of Engineering Sciences
A. N. Akishev², Head of a Department, Candidate of Engineering Sciences, akishevan@alrosa.ru
I. B. Bokiyy², Head of a Laboratory, Candidate of Physical and Mathematical Sciences
N. M. Sherstyuk², I CAT Engineer
¹Mirny Polytechnic Institute (Division), Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russia
²Yakutniproalmaz Institute, ALROSA, Mirny, Russia

Abstract

A specific feature of open pit mining of diamond deposits in Western Yakutia is the construction of the open pits in the zone of negative ambient temperatures, which includes thick permafrost rock mass, and which is at the same time complicated by the influence of cryogenic processes on deformation of pit wall benches.

The paper presents the comparative analysis of strength characteristics in frozen and thawed rocks, stability of benches during mining, the general geomechanical approach to the determination of

parameters of non-mining walls of the ultra-deep open pit diamond mines, and the parameters of non-mining walls and benches.

Optimization of open pit wall configuration should primarily be based on the maximum utilization of the strength properties of frozen rocks in combination with the development of new approaches, calculation schemes and methods for assessing stability of open pit walls and benches of unconventional design, including the non-mining vertical benches.

The main design characteristic that determines the parameters of open pit walls is the structural tectonic relaxation coefficient, which specifies the calculated value of cohesion in rock mass. For the diamond deposits, the values of the structural relaxation coefficient were obtained in a series of field tests and back calculations. Full-scale tests were carried out both during exploration operations in underground mines and in open pits. The accuracy of determining the values of the structural relaxation coefficient in the range of 0.085–0.11 is confirmed by the parameters of non-mining walls in an open pit mine 385–640 m deep, with overall slope angles of 38–55° and a steeper H 0.35–0.5 lower part having the slope angle of up to 70° with average strength characteristics of 7.85–11.84 MPa and the internal friction angle of 28.1–37.4°.

Using the natural load-bearing capacity of rock mass to the full advantage, which the values of the structural relaxation coefficient of deposits show, allows optimization of open pit wall slope design and minimization of stripping operations.

Keywords: kimberlite pipe, ultra-deep open pit, geomechanical model, structural relaxation coefficient, strength characteristics frozen and thawed rocks.

References

1. Gluzman G. R. Analysis and prevention of deformations of slope composed of permafrost rocks : thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Leningrad, 1968. 26 p.
2. Rozenbaum M. A. Geomechanical framework for the ground control in coal mining in the permafrost zone : Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Saint-Petersburg, 1996. 363 p.
3. Ermakov I. I. Analysis of slope stability in round and oval pits in the conditions of permafrost rocks : A case-study of Mir kimberlite pipe : Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Leningrad, 1965. 150 p.
4. Kozeev A. A., Izakson V. Yu., Zvonarev N. K. Thermo- and geomechanics of diamond deposits. Novosibirsk : Nauka, 1995. 243 p.
5. Guidelines on determination of slope angles for benches and pit walls composed of permafrost rocks. Leningrad : VNIMI, 1972. 106 p.
6. Rules of slope stability provision on coal strip mines. Saint-Petersburg : VNIMI, 1998. 208 p.
7. Zakharov V. N., Rylnikova M. V., Nikiforova I. L. Development of scientific and methodological foundations for the design of mining systems in open pit development. *GIAB*. 2017. Special Issue 37. Open pit mining in the 21st century : Results, problems, potential growth prospects-1. pp. 13–26.
8. Zoteev V. G., Zoteev O. V. About necessity of improvement of standard&methodical base on geomechanical security of open mining work. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 1. pp. 66–68.
9. Rylnikova M. V., Zoteev O. V., Nikiforova I. L. Development of the regulatory framework to provide the stability of pitwalls and benches of quarries, opencast mines and spoil dumps. *Gornaya promyshlennost*. 2018. No. 3. pp. 95–98.
10. Tsirel S. V., Pavlovich A. A. Challenges and advancement in geomechanical justification of pit wall designs. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 7. pp. 39–45. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.07
11. Zhabko A. V. Theory of calculation of slopes and grounds stability. analysis, characterization and classification of existing methods for calculating the slopes stability. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2015. No. 4(40). pp. 45–57.
12. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. 487 p.
13. Chaoyi Sun, Congxin Chen, Yun Zheng, Kaizong Xia, Wei Zhang. Topping Failure Analysis of Anti-Dip Bedding Rock Slopes Subjected to Crest Loads. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. 2018. Vol. 12, No. 11. pp. 685–693.
14. Yun Zheng, Congxin Chen, Tingting Liu, Kaizong Xia, Xiumin Liu. Stability analysis of rock slopes against sliding or flexural-toppling failure. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2018. No. 4. DOI: 10.1007/s10064-017-1062-z
15. Bar N., Barton N. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50, Iss. 12. pp. 3307–3322.
16. Azhari A., Ozbay U. Investigating the effect of earthquakes on open pit mine slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 100. pp. 218–228.
17. Pustovoytova T. K., Gurin A. N., Kagermazova S. V. Slope stability in permafrost rock masses. *VNIMI Transactions : Collected papers*. Leningrad, 1980. pp. 101–105.
18. Akishev A. N., Boki I. B., Zyryanov I. V. On the development of geotechnology for open-cast mining of diamond deposits. *Mining technology improvement and personnel training toward the technosphere safety in the north-east of Russia : Proceedings of All-Russian Conference with International Participation on the Occasion of Professor E. N. Chemezov's 80th Anniversary*. Yakutsk, 2018. pp. 267–274.
19. Zyryanov I. V., Akishev A. N., Boki I. B., Bondarenko I. F. Innovations in diamond mine planning in a permafrost zone. *Gornaya promyshlennost*. 2018. No. 5. pp. 66–69.
20. Akishev A. N., Boki I. B. To the issue about possibility of increasing an open pit slope angle in conditions of a cryolithozone. *GIAB*. 2014. No. 8. pp. 36–40.