© Г.М. Еремин, 2005

УДК 622.271.333

Г.М. Еремин

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ОТКОСАМИ УСТУПОВ В ГЛУБОКИХ ЗОНАХ

Отличительная особенность бортов в породах с косой и крутой слоистостью – зависимость величины углов их наклона от предельных параметров нерабочих уступов и берм [1, 2, 3].

Оптимальным будет конструктивный угол наклона $\alpha_к \leq \alpha_{пр}$. Высокая прочность пород в куске решающей роли не играет [3]. Параметры уступов (угол откоса или высота) ограничиваются наличием в массиве поверхностей ослабления, не подлежащих подрезке откосом (системы трещин, контакты между различными литотипами и слоями, чередующиеся слабые пропластки и др.). Попытка придать уступам крутые углы откоса без учета падения контактов вызывает деформацию сдвига и самозаоткоску уступов по контактам и трещинам, хотя борт в целом имеет избыточный запас прочности. Таким образом при придании уступам углов $\alpha_4 = \beta$ конструкция борта и угол его наклона будут зависеть от предельной высоты уступов, ширины и числа берм различного назначения, в соответствии с рис. 1 а, б, в [3].

Углы заоткоски уступов проняты равными углу падения слоистости (ослаблений) при высоте уступов $h_у$ = 25 м и бермах ширины 12,2 м с учетом некоторого их осыпания во времени. Угол откоса участка борта составляет 56°, а угол его откоса с учетом длительного состояния составляет 53°.

Учет прочностных свойство пород при определении параметров откосов уступов и бортов карьеров и разрушения берм.

Выше было отмечено, в случае, если параметры уступов (угол откоса или высота) ограничиваются наличием в массиве поверхностей ослабления, не подлежащих подрезке откосом, высокая прочность пород в куске решающей роли не играет. Действительно, при крутой слоистости пород (ослаблений), трещинах дополнительное разрушение приоткосного слоя при производстве заоткоски уступа вызовет, если не одновременное с формированием откоса осыпание пород, то в течение сравнительно короткого времени.

Вместе с тем, дальнейшее разрушение берм и откосов уступов зависит от прочности пород, в том числе от прочности породы в куске.

Проанализировано влияние прочностных свойств пород на параметры откосов бортов карьеров, а также зависимость величин характеристик пород – угла внутреннего трения φ и сцепления С от предела прочности породы на сжатие $\sigma_{сж}$ и на разрыв $\sigma_р$. Анализ этих зависимостей важен с той точки зрения, что появляется возможность оценить и сравнить разрушаемость (выветриваемость) откосов и берм на Ковдорском железорудном месторождении и апатитовых месторождениях в Хибинах во времени.

В результате анализа установлено:

Изменение показателя сцепление породы С и угла внутреннего трения φ находятся в прямо пропорциональной зависимости от значений предела прочности породы на сжатие ($\sigma_{сж}$) растяжение ($\sigma_р$), в соответствии с рис. 2а, б – 1, 1′ – соответственно для $\sigma_{сж}$ и $\sigma_р$ – для Центрального рудника; 2, 2′ – то же для пород Ковдорского карьера; 3, 3′ – то же для пород Коашвинского карьера (АО «Апатит»);в соответствии с рисунком 1б – т. А – данные И.А. Турчанинова и др. (1967 г.), т. Б – данные для пород Удокана; К – Ковдор.

Из этих зависимостей следует, что наименьшим сцеплением обладают породы Центрального рудника, наибольшим породы Коашвинского карьера и среднее положение занимают породы Ковдорского карьера. Почти такой же порядок положения кривых изменения угла φ в зависимости от $\sigma_{сж}$ и $\sigma_р$ для

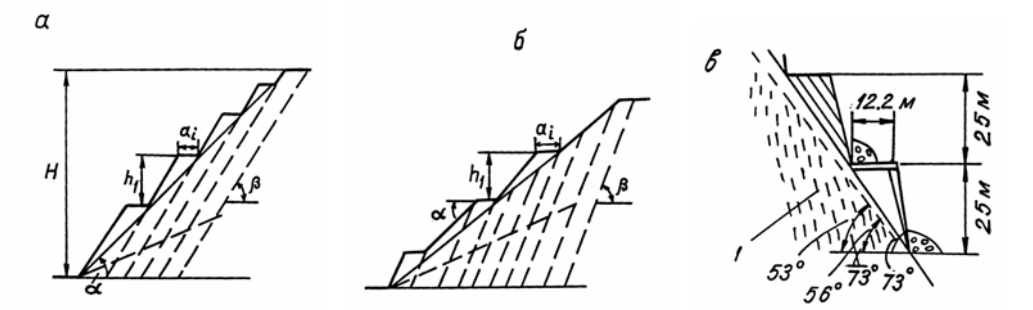


Рис. 1. Схема конструкции участка борта с предельной высотой уступов (а) и с надрезкой контактов (б) и наличии напластований (в)

пород указанных месторождений. Отличием является значительные величины угла φ для пород Ковдорского карьера.

Параметры устойчивых откосов уступов зависят от известного параметра H_{90} по методике ВНИМИ. В свою очередь, величина H_{90} зависит от показателя сцепления породы в массиве и определяется по известной формуле.

Проанализирована возможность использования известной формулы ВНИМИ для определения сцепления пород в массиве $C_м$ для крупноблочных и близких к монолитным породам

$$C_м = \frac{C}{1 + a\lambda n \frac{H}{\lambda}}, \qquad (1)$$

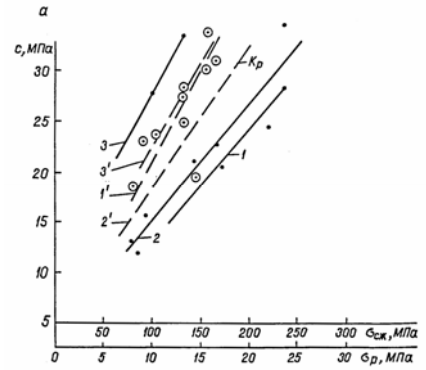
где С – сцепление в куске; α – определяется по данным ВНИМИ [4]; Н, ℓ – соответственно высота откоса и величина размера отдельности, м.

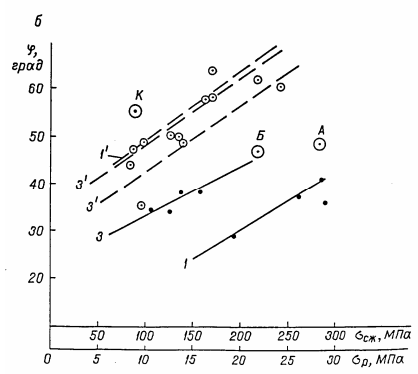
При большой блочности пород и для массивов, близких к монолитным определение величины сцепления пород в массиве представляет определенную трудность. Так, при высоте откоса Н = 15 м и размере отдельностей ℓ~15 м для прочных пород сцепление в массиве близко к сцеплению в куске, т. е. $C_м = C_к$= 23,5 МПа, то же наблюдается и при высоте массива Н=30 м и размере блоков ℓ =~30 м $C_м = C_к$ = 23,5 МПа.

Для таких условий, видимо, необходимо использовать и экспериментальные методы, а также данные по определению блочности пород при проведении колонкового бурения. Для этих условий при значительной разнице в показателях прочностных свойств пород в приоткосном слое и в самом массиве следует дифференцированно определять устойчивость откосов уступов и участков или борта в целом.

Близкие по значению величины сцепления и угла внутреннего трения пород в приоткосном слое и в массиве могут быть лишь при значительном нарушении массива тектоникой

Рис. 2. Изменения сцепления (а) и угла внутреннего трения (б) от предела прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$) и разрыв ($\sigma_р$) а –1,1′ – для пород Центрального рудника АО «Апатит»; 2,2′ – для пород Ковдора; 3,3′ – для Коашвинского месторождения; б – для пород Центрального рудника АО «Апатит»





и наличии трещин или пропластков, падающих в сторону выемки карьера или в породах, близких к полускальным.

В расчетах по определению параметров откосов уступов и бортов карьеров часто используются данные по углам внутреннего трения, установленные с помощью метода Мора.

Установлено, что применение метода Мора для определения величины угла внутреннего трения неправомерно, поскольку это может привести к большим погрешностям. Стремление определить величину сцепления пород таким способом приводит к уменьшению угла внутреннего трения в 2-3 раза (по отдельным моделям, в соответствии с рис. 3а, б, в, г).

На рис. 3г приведена кривая (1) для суглинков (φ = 24º) (ВНИМИ – [4]), данные автора при испытании фракций 5-10, 10-15 мм на сдвиг (породы Центрального рудника АО «Апатит» – кривая 2(φ = 43º)Э, по методу Мора (кривая 3) и для скальных пород (кривая 4).

Начало кривой тангенциальных напряжений не в т. А (по методу Мора), а в начале координат.

Ширина предохранительных берм определяется с учетом ее части, разрушающейся во времени под действием техногенных факторов и выветривания (сработка берм).

В настоящее время существует ряд формул, предлагаемых исследователями (Г.Р. Глозман, Е.К. Гречищев и др.) для определения величины параметров берм и ее сработки во времени. Однако расчетные величины параметров берм часто расходятся с данными практики работ и превышают их в 2-3 раза. Это происходит в результате того, что сложно учесть во времени техногенную трещиноватость пород откосов, степень выветривания пород и их прочность.

Более обосновано применение двухзвенных формул, учитывающих влияние как фактора времени (t), так и прочности пород (f) вида

$$\Delta Б = \lambda_t + \tau_f \qquad (2)$$

где ΔБ – изменение ширины бермы, м; λ_t, τ_f – соответственно изменение бермы при влиянии длительности стояния откосов и прочности (крепости) пород.

В некоторых случаях может быть целесообразно применение эмпирической зависимости вида

$$\Delta Б = \frac{A_c \lambda_t^{x_1}}{\lambda^{x_2}} \qquad (3)$$

где А – постоянная; x_1, x_2 – показатели степени.

В работе [5] для определения изменения ширины бермы предложена зависимость вида

$$\Delta Б = \left(a - b \cdot t^2 + ct\right) \cdot A_f \cdot f^{-n} \qquad (4)$$

где а, в, с – коэффициенты; t – время; А – параметр, зависящий от крепости пород (f).

Применение данной методики исключает принятие малых значений угла внутреннего трения для скальных пород и позволяет резко

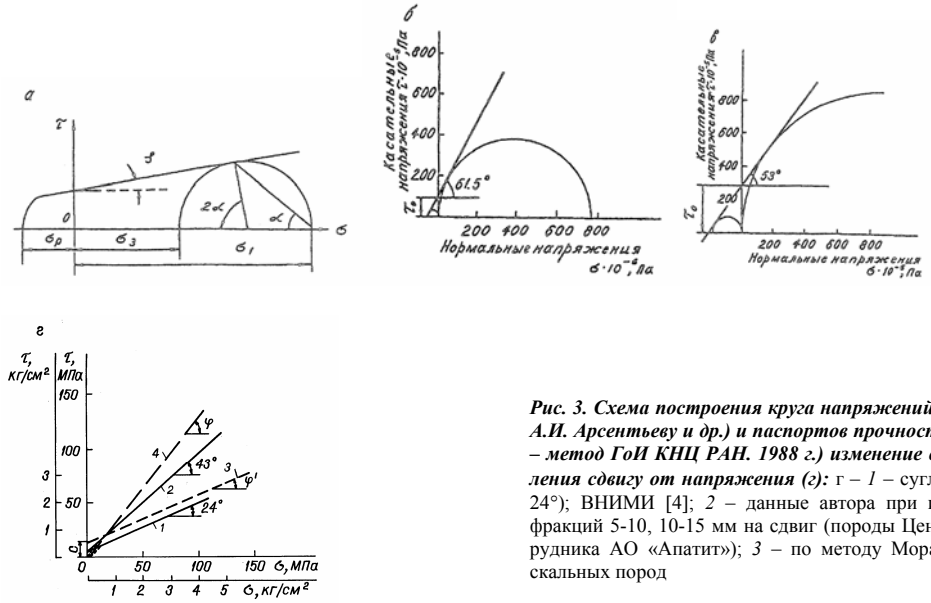


Рис. 3. Схема построения круга напряжений Мора (по А.И. Арсентьеву и др.) и паспортов прочности (а) (б, в – метод ГоИ КНЦ РАН. 1988 г.) изменение сопротивления сдвигу от напряжения (г): г – *1* – суглинок (φ = 24°); ВНИМИ [4]; *2* – данные автора при испытании фракций 5-10, 10-15 мм на сдвиг (породы Центрального рудника АО «Апатит»); *3* – по методу Мора; *4* – для скальных пород

повысить параметры откосов уступов и бортов карьеров в скальных массивах.

Ниже на основе данных наблюдений на некоторых карьерах приведена оценка скорости (интенсивности) разрушения берм по эмпирической зависимости, связывающей скорость разрушения бермы и коэффициент крепости породы.

Расчеты по ней при времени стояния t = 10 лет и соответствующих коэффициентах для пород с крепостью f = 12 дают изменение бермы ΔБ = 3.4 м, а при крепости f = 16 расчет дает ΔБ = 3 м. Это достаточно близко к данным ВНИМИ, полученным для карьеров ОАО «Апатит» и равным 0.8-3 м при длительности стояния берм 10 лет, 1.5-4.6 м – при t = 20 лет.

Как следует из расчетных данных, с увеличением крепости пород скорость разрушения берм во времени снижается до минимума, соответствующей пределу прочности порода на сжатие $\sigma_{сж}$ = 200-250 МПа и более.

Устойчивость берм повышается со снижением трещиноватости массива и в крепких породах. Это создает возможность для регулирования углом откоса уступа и числом берм на глубоких горизонтах, где трещиноватость пород снижается до минимума (Ковдорский, Коашвинский карьеры и карьер рудника Центральный ОАО «Апатит»).

В связи с этим появляется возможность создания новых конструкций участков бортов карьера в глубоких зонах по сравнению с проектным, а также их углубки при повышении прочности и устойчивости пород.

По результатам анализа существующих рекомендаций по конструкции бортов карьеров и анализа проектных решений сделан вывод, что наиболее оптимальной конструкцией борта карьера, отвечающей условиям нарушенности массивов пород с глубиной месторождений, структуре залегания пород и снижающейся трещиноватости пород на средних и глубоких горизонтах, является равнопрочный борт с выпуклым профилем. Эффективность его применения показана на примере Ковдорского карьера комплексных железных руд, Коашвинского и Ньоркпахкского карьеров апатитонефелиновых руд.

Для Ньоркпахкского карьера ОАО «Апатит» наряду с другими вариантами конструкции борта карьера рассмотрен также вариант с увеличивающейся крутизной борта к дну карьера. Такое решение достаточно правомерно, учитывая непродолжительный срок отработки карьера и снижение трещиноватости пород с глубиной месторождения.

Кроме снижения объемов вскрыши при применении выпуклого борта большей крутизны, чем по проекту, можно дополнительно отработать открытым способом в придонной зоне и дне карьера дополнительно около 10 млн т руды. Для этих условий снижение объемов вскрыши в бортах карьера может составить 25-30 млн м^3.

Основные положения новых технологий разработки месторождений полезных ископаемых с увеличивающейся крутизной участков бортов вплоть до отвесных.

Исследованиями, проведенными в последние годы как у нас в стране, так и за рубежом обосновано, что при разработке месторождений особенно магматического типа с крепкими вмещающими породами имеется возможность повышения углов наклона бортов карьеров вплоть до максимально возможных. При этом, учитывая, что верхняя зона покрывающих пород более нарушена, стремятся достичь эффектов при конструировании уступов и бортов в нижней глубокой зоне карьера. Об этом свидетельствует опыт работы зарубежных карьеров (Канада, Швеция), стран СНГ (Казахстан, Узбекистан) и отечественных (карьеры алмазных трубок «Мир», «Юбилейный»).

Поскольку в этих зонах конструктивные углы бортов зависят от высоты и угла наклона уступов, ширина предохранительных и транспортных берм могут создаться ряд условий, когда конструктивные углы бортов αк могут быть близкими к предельному углу наклона по фактору устойчивости αу, меньше его или значительно положе.

Эти условия могут быть записаны в виде

$$\text{I} - \alpha_к \approx \alpha_у \qquad (5)$$

$$\text{II} - \alpha_к < \alpha_у$$

$$\text{III} - \alpha_к << \alpha_у$$

Во втором и, особенно в третьем случае увеличение угла откоса нерабочего борта карьера позволяет уменьшить объем вскрыши в граничном контуре карьера при определенной глубине или увеличить глубину карьера при определенном граничном коэффициенте вскрыши.

В проектах при конструировании бортов карьеров часто используют параметры сдвоенных уступов высотой 30 м и углом наклона 60-70°. Этим параметрам, а также принимаемым прочностным свойствам пород (сцепление 0,5-0,7 МПа и угол внутреннего трения φ = 36-38°)

чаще соответствуют углы наклона бортов, изменяющиеся от 38-39 до 45-47° при их высоте 250-600 м. В этом диапазоне изменения высоты борта очевидно, меньшей высоте борта соответствуют большие значения угла откоса борта. Так, при указанных выше данных по прочностным свойствам и высоте Коашвинского карьера ОАО «Апатит» 600-700 м его угол наклона по проекту составляет 38-40°.

В условиях снижающейся с глубиной нарушенности и трещиноватости пород массивов, уменьшающимися параметрами выемки (карьера), что резко снижает эффективные сдвигающие напряжения при возрастании напряжений сопротивления сдвигу, более глубоких зонам массива борта свойственна большая устойчивость. Теоретически это доказано ранее проведенными исследованиями, а практически подтверждено опытом работы карьеров как за рубежом, СНГ, так и на некоторых отечественных карьерах. При этом углы откосов участков конструктивных бортов в этих зонах могут достигать 60-70°. Изменение угла наклона борта по сравнению с проектом может составить 20-25°.

В зависимости от мощности рудного тела и угла его падения, а также глубины зоны доработки карьера прирост запасов руды может составить десятки миллионов тонн.

Однако, чтобы обеспечить разработку этих запасов и довести углы погашения нерабочих бортов карьеров до величин, близких к предельно устойчивым, необходимо решить следующие технологические задачи.

1. Разработать и обеспечить выполнение необходимых технологических мероприятий по повышению безопасности горных работ вблизи крутых бортов.

2. Изменить схему вскрытия рудных горизонтов, поскольку количество транспортных берм на нерабочих бортах могут быть уменьшены до минимума.

В зависимости от производительности карьера реализация данных схем разработки рудных тел возможна следующими способами.

1. При небольшой производительности карьера $A_р$ = 0.5-2 млн т/год и достаточно устойчивых породах отработку запасов руды в глубоких зонах карьера можно осуществлять по технологии, разработанной д.т.н. Р.Б. Юном (корпорация «Казахмыс»). По ней при разработке крутопадающих рудных залежей транспортные коммуникации располагают в подземных горных выработках (автоуклонах). На каждом горизонте по мере приближения горных работ к границам карьера оставляют предохранительную призму шириной достаточной для обеспечения безопасной работы на этом и нижележащем горизонте. Из условия недопущения попадания в рабочее пространство карьера возможных обрушений и отслоений пород с откосом борта ее ширина рекомендуется не менее 20-30 м.

Отработка предохранительных призм осуществляется на заключительном этапе работы на горизонте.

Для обеспечения устойчивости вертикальных откосов уступов в его верхней части (15-30 м) применяют технологию предварительного щелеобразования. Для этого скважины диаметром 250 м бурят в один ряд вдоль проектной бровки уступа на глубину 15 или 30 м. В качестве зарядов используют шланговые или гирляндные заряды с минимальной (4-5 кг/м) линейной плотностью заряда. Технологические скважины начинают взрывать за 20-30 м после образования щели.

При оформление поверхности откоса уступа ниже 30 м от верхней бровки применяют горизонтальные скважины уменьшенного (100-120 мм) диаметра.

Погрузку отбитой горной массы и доставку ее в безопасную зону за пределы призмы безопасности предусматривается вести с использованием самоходного погрузочно-доставочного оборудования с дистанционным управлением, способного эффективно работать в опасных зонах без присутствия человека (управление с помощью радио или теле сигналов, передаваемых с переносного пульта).

По проектам для отдельных карьеров высота подъема руды по автоуклонам составляет 60-75 м. На некоторых карьерах предусматривается применение крутонаклонных конвейеров.

2. При производительности карьера $A_р$ = 3-5 млн т/год и устойчивых скальных породах глубина карьера может быть увеличена на 100 м за счет отстройки крутых участков бортов вплоть до вертикальных на последних горизонтах (от дна карьера). При этом транспортирование горной массы может осуществляться обычным способом с использованием автотранспорта. До отработки предохранительных призм транспортные бермы располагаются как на них, так и временных съездах рабочего борта. При подработке предохранительных призм и доработке карьера транспортировка руды может осуществляться автотранспортом мень-

шей грузоподъемности (30-50 т) и меньшей ширине транспортных берм (20-25 м). Для доставки руды могут использоваться и автосамосвалы для подземных работ типа ТОРО 560 грузоподъемностью 30,4 т, преодолевающих крутые уклоны.

В некоторых случаях целесообразным может оказаться применение крутонаклонных конвейеров. Погрузка руды в транспортные средств может осуществляться с помощью погрузчиков.

Подобные технологические схемы разработки близки к технологии разработки алмазных трубок с устойчивыми откосами и с сужающимся карьерным пространством к дну карьера.

3. При разработке мощных и средней мощности крутопадающих рудных тел и применении крутых откосов бортов в глубокой зоне глубина карьера может быть повышена на 150-200 м, а производительность его составлять 5-10 млн т/год. В этих условиях создается возможность вести разработку на полную мощность рудного тела. Это обеспечивает также возможность разработки запасов в бортах карьера открытым способом, что снижает потери в 5-6 раз.

Устойчивость откосов бортов карьера обеспечивается как за счет повышения сцепления пород массива при снижающейся трещиноватости и нарушений тектоникой, так и применением более эффективной технологии заоткоски уступов и постановки борта в конечное положение, чем традиционная.

При углублении горных работ ниже 400-600 м от поверхности по сравнению с проектом изменяется схема вскрытия и транспорта руды и вскрыши, поскольку в сужающемся карьерном пространстве обычный транспорт выходит из зоны оптимального функционирования или необходима перегрузка с автотранспорта меньшей грузоподъемности на автотранспорт большей грузоподъемности. Также необходимо детально изучить схемы комбинированного транспорта с использованием автотранспорта и циклично-поточной технологии. Представляются перспективными новые технологии с использованием крутонаклонных конвейеров на участках бортов карьера или в специальных выработках. Немаловажное значение могут иметь технологии с использованием рудоспусков, обеспечивающих получение минимального плеча транспортирования руды и быструю окупаемость вложенных средств на реконструкцию карьера.

Научные положения, выводы и рекомендации

В результате проведенных исследований установлены и уточнены следующие научные положения:

1. Конструкция бортов уступов и борта карьера должна определяться исходя из величины сцепления пород по ослаблениям, развивающихся длительное время за счет техногенных нагрузок и выветривания, и предопределяющих дифференцированные углы откосов по глубине до вертикальных участков на период завершения формирования борта в скальных породах.

2. В условиях снижающейся трещиноватости пород и повышения сцепления с глубиной месторождения имеется возможность разработки запасов ниже дна карьера по проектам при крутых бортах и устойчивости, превышающей устойчивость бортов карьеров алмазных трубок, до глубины, определяемой углом падения рудного тела, и оптимальной областью действия комбинированного транспорта, в том числе применением крутонаклонных конвейеров.

Другие научные результаты:

1. По данным экспериментов величина показателя сцепления породы С и угла внутреннего трения φ находятся в прямо пропорциональной зависимости от предела прочности породы на сжатие ($\sigma_{сж}$) и растяжение ($\sigma_р$). Поэтому при разрушении и выветривании пород их прочностные характеристики уменьшаются по обоим показателям: как С, так и φ, а не так как в принятых в расчетных методах – по сцеплению в массиве ($C_и$).

2. При большой блочности пород, соизмеримых с высотой уступа определение величины сцепления в массиве расчетным путем представляет определенную сложность. По известной формуле ВНИМИ для высот откосов h_1 = 15 м и h_2 = 30 м и размерах блоков d_1 и d_2, близких к вышеуказанной, сцепление в массиве, как в том, так и другом случаях составят равным сцеплению в куске ($C_к$), что требует экспериментальной проверки.

3. Установлено, что применение метода Моора для определения величины угла внутреннего трения неправомерно, поскольку при этом в 2-3 раза снижается его величина, а сцепление породы завышается (начало кривой

тангенциальных напряжений в начале координат).

В качестве практических рекомендаций:

1. При разработке запасов ниже дна карьера по проекту в условиях снижающегося карьерного пространства наиболее оптимальной конструкцией борта, отвечающей структуре залегания пород и снижающейся трещиноватости массивов, является равнопрочный борт с выпуклым профилем. Такая форма борта карьера рассмотрена для Ковдорского карьера комплексных железных руд, Коашвинского и Ньоркпахского карьеров апатитонефелиновых руд. Снижение объемов вскрыши от их выполаживания по проекту 25-50 млн. $м^3$ и более в зависимости от глубины перехода на применение выпуклого борта.

2. Заоткоска уступов и участков борта со стороны лежачего бока залежи не должна производиться под углами, близкими к углам падения ослаблений и рудной залежи, иначе может наблюдаться не только осыпание, но деформация и смещение участков борта (Ковдорский карьер комплексных железных руд).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голицин В.В., Иванов С.В., Жуковский Я.М.* Вопросы устойчивости бортов железорудных карьеров // Проектирование предприятий горнорудной промышленности. – М.: Недра.1976. – С. 48-59.

2. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. Изд. ВНИМИ. С-Петербург, 1998. – 208 с.

3. *Галустьян Э.Л.* Типизация бортов карьеров по критерию оптимальности углов их наклона // Горный журнал – 1999. – №2. – С. 29-33.

4. Методические указания по определению углов наклона бортов откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.: ВНИМИ. – 1972. – 165 с.

1. *Косолапов А.И., Рокин В.И., Веретенова Т.А.* Оценка влияния срока службы и прочности пород на изменение ширины предохранительных берм. Горн. инф.-аналит. бюлл. – №11-12. – М.: Изд. МГГУ. – С. 175-177.

Коротко об авторах

Еремин Г.И. – кандидат технических наук, Горный институт Кольского научного центра РАН.