

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-14-22



ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Калмыков В.Н.¹, Мажитов А.М.¹, Кравчук Т.С.², Зотеев О.В.³

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

³Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Вариантов комбинаций открытого и подземного способов отработки одного месторождения на сегодняшний день в практике ведения горных работ существует большое количество. Эти комбинации зависят от морфологии рудных тел и их горно-геологического залегания, количества запасов, производственной мощности объекта и многих других факторов. В случае отработки запасов полезного ископаемого в бортах карьера подземными горными работами существенно изменяется геомеханическая ситуация, а следовательно, осложняется и оценка устойчивости подработанных откосов уступов. Основной сложностью при геомеханической оценке устойчивости подработанных откосов бортов является определение положения наиболее вероятной поверхности скольжения, которое будет зависеть не только от общеустановленных, классических факторов, но и от формы и конструктивных параметров барьерного целика, варианта используемой системы подземной разработки, а также размеров пригружающего навала пород. Целью исследований является разработка методики оценки устойчивости подработанных бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков. Для этого были изучены два разных варианта подземной отработки барьерных целиков в бортах карьера. В результате использования графического и графоаналитического методов исследований были получены основные методические положения по оценке устойчивости подработанных бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков. Анализ проведенных геомеханических расчетов показал, что потенциальная поверхность скольжения для подрабатываемого борта имеет сложную конфигурацию, в каждом случае индивидуальную и требующую учета сопряжения возможной призмы обрушения самого борта и зон сдвижения, которые дает отработка рудных тел подземным способом. Применение разработанных методических положений позволит выполнить практическую оценку устойчивости откосов бортов для месторождений, обрабатываемых открыто-подземным способом с подземной отработкой барьерных целиков.

Ключевые слова: подработанные откосы бортов, барьерные целики, поверхность скольжения, методика оценки устойчивости откосов бортов

© Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С., Зотеев О.В., 2025

Для цитирования

Геомеханическая оценка устойчивости бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков / Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С., Зотеев О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 14-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-14-22>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF THE STABILITY OF QUARRY SIDES DURING UNDERGROUND MINING OF BARRIER PILLARS

Kalmykov V.N.¹, Mazhitov A.M.¹, Kravchuk T.S.², Zoteev O.V.³

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

³Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. When developing steeply dipping deposits of valuable ores using the open-pit and underground methods, a barrier pillar is formed in the sides and the bottom part at the boundary and is usually extracted last. If its reserves are mined by underground mining methods, the geomechanical situation changes significantly, which complicates the assessment of the undermined ledges stability. The main problem in the geotechnical assessment of the stability of undermined slopes is the choice of the most likely sliding surface, which will be determined by the combined effect of open-pit and underground mining, the morphology and size of the barrier pillar, the extraction technology, and the state of the open-pit and underground mined-out spaces. The purpose of these studies is to develop a method for calculating the stability of undermined quarry slopes during the extraction of barrier pillars. Two typical scenarios of underground mining of barrier pillars in quarry slopes were studied. As a result of these studies, the main methodological principles for assessing the stability of undermined quarry slopes were formulated. The analysis of the conducted geomechanical calculations showed that the potential sliding surface for the undermined slope had a complex configuration, which was individual in each case and included the intersection of possible sliding surfaces of the ledges, the slope itself, and the zones of displacement formed by underground work. The application of the obtained methodological guidelines will allow for a practical assessment of the stability of the slopes for deposits developed by the open-pit and underground methods.

Keywords: undermined slopes, barrier pillars, sliding surface, methodology for assessing the stability of the sides slopes

For citation

Kalmykov V.N., Mazhitov A.M., Kravchuk T.S., Zoteev O.V. Geomechanical Assessment of the Stability of Quarry Sides During Underground Mining of Barrier Pillars. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 14-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-14-22>

Введение

На сегодняшний день в практике ведения горных работ существует большое количество вариантов последующей доработки запасов месторождения подземным способом после окончания открытых горных работ. Причем каждый вариант отличается типом подработки откосов бортов карьера и зависит от морфологии рудных тел, ориентации углов залегания относительно борта карьера, объема запасов, производственной мощности подземного рудника и других факторов. Доработка запасов, находящихся за контуром карьера, подземным способом оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи бортов, что осложняет последующую эксплуатацию месторождения, снижает полноту освоения недр и безопасность ведения горных работ.

Сложностью геомеханической оценки устойчивости откосов бортов карьера при доработке запасов подземным способом является правильное определение положения наиболее вероятной общей поверхности скольжения от открытых и подземных горных работ. Точность расчетов определяется наряду с об-

ще установленными классическими методиками также обязательным условием влияния подземных горных работ и построения общей поверхности скольжения с учетом формы и конструктивных параметров барьерного целика, варианта используемой системы подземной разработки, а также при наличии размеров пригружающего навала пород.

В статье представлен подход к комплексной оценке устойчивости подработанных бортов карьера подземными горными работами, в частности при отработке основных запасов и барьерных целиков. Предлагаемый подход служит как основа для ряда исследований зависимости формы поверхности потенциальной деформации борта от факторов техногенного воздействия подземной разработки месторождения, определяемых типом подработки откосов.

Методы и результаты исследования

Оценка устойчивости подработанных бортов основана на использовании теории предельного равновесия. Этот метод подходит для всех этапов отработки месторождения, как открытым, так и открыто-подземным способом [1-5]. Устойчивость откосов обеспечивается в том случае, если отношение удержи-

вающих сил в массиве к силам сдвигающим, действующим по наиболее слабой поверхности сдвижения, превышает нормативное значение коэффициента запаса устойчивости. Сбор, обработка и анализ исходных данных о физико-механических свойствах пород выполняется в соответствии с рекомендациями [6].

В ранее проведенных исследованиях [10, 11] установлена пространственная форма поверхности деформации. Длина трещины-закола ограничивает размеры деформации откоса по его простиранию. Призма самой деформации симметрична относительно вертикального осевого сечения. Соотношение поперечно-горизонтальных и вертикальных напряжений на различной глубине массива и различном расстоянии от откоса формирует осевую линию скольжения.

Проведение подземных работ в прикарьерной зоне, согласно результатам исследований, оказывает влияние на механизм формирования зон пластических деформаций, на конфигурацию поверхности обрушения откосов и борта в целом [7-9].

Для определения положения и формы поверхности сдвижения, как показывают исследования по данной тематике, чаще всего используются методы физического или математического моделирования, которые позволяют количественно оценить влияние процесса отработки барьерных целиков на состояние борта карьера с учетом действующих в массиве природных тектонических сил, соотношения упругих характеристик пород, геометрических размеров карьера и подземных очистных выработок. На основе анализа напряженно-деформированного состояния подработанного борта, характера деформаций, механизма разрушения откосов и несущих элементов горной конструкции от ведения открытых и подземных горных работ путем сопряжения поверхностей пластических деформаций находится совокупная поверхность скольжения [7-9].

В предлагаемой методике определения положения и формы поверхности сдвижения также используется метод вариантного моделирования, который позволяет прогнозировать интегральную конфигурацию поверхностей сдвижения при отработке барьерных целиков. Основной принцип моделирования заключается в рассмотрении возможных комбинаций схем деформирования, в которых учитываются разные механизмы разрушения откосов бортов от последовательного ведения открытых и подземных горных работ.

При моделировании оценки устойчивости подработанных бортов карьера рассматриваются два варианта выемки барьерных целиков подземным способом при отработке основных запасов за предельным контуром карьера с использованием систем разработки с закладкой:

I вариант – выемка барьерного целика производится системой разработки с обрушением руды и

вмещающих пород с обязательным пригрузом борта карьера навалом вскрышных пород, назначение которого состоит в предотвращении аэродинамических связей подземных выработок с атмосферой. Данный вариант рассматривается как оказывающий наибольшее влияние на устойчивость борта карьера. Вариант рассматривается для отработки рудных тел малой мощности при простирании барьерного целика вдоль борта карьера (рис. 1).

II вариант – выемка барьерного целика производится камерной системой разработки с твердеющей закладкой. При этом также обеспечивается создание пригрузки из скальных пород. Вариант рассматривается при отработке рудных тел малой мощности при незначительной протяженности барьерного целика вдоль борта карьера (рис. 2).

Первый вариант характеризуется широким диапазоном вариантов залегания рудных тел малой мощности относительно бортов карьера: некоторые рудные тела имеют согласное (параллельное) падение с откосом борта карьера, другие пересекают его. Расположение рудных тел по высоте также резко разнится от нижней части борта, вверх поуступно (см. рис. 1).

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований были определены основные методические положения по оценке устойчивости подработанных бортов карьера, нарушенные подземной отработкой барьерных целиков различными вариантами. Согласно исследованиям, порядок расчета устойчивости откосов борта карьера состоит в следующем (по вариантам):

Для I варианта:

1. Выбирается наиболее опасный участок борта карьера с точки зрения устойчивости после отработки барьерного целика подземным способом.

2. Выполняется построение поверхности скольжения для опасного локального участка и рассчитывается по ней коэффициент запаса устойчивости.

3. Размеры обрабатываемых рудных тел подземным способом относительно борта карьера незначительны и поэтому влияют на общую устойчивость только в том случае, если их выемка приведет к нарушению локального участка борта, где непосредственно залегает рудное тело.

4. Соответствие запаса устойчивости локального участка нормативному значению в области отработки рудного тела означает, что деформаций в этой области не будет, а подземные горные работы не повлияют на общую устойчивость борта. Оценивать ее не требуется.

Примеры построенных поверхностей скольжения для I варианта отработки барьерных целиков представлены на рис. 3-5.

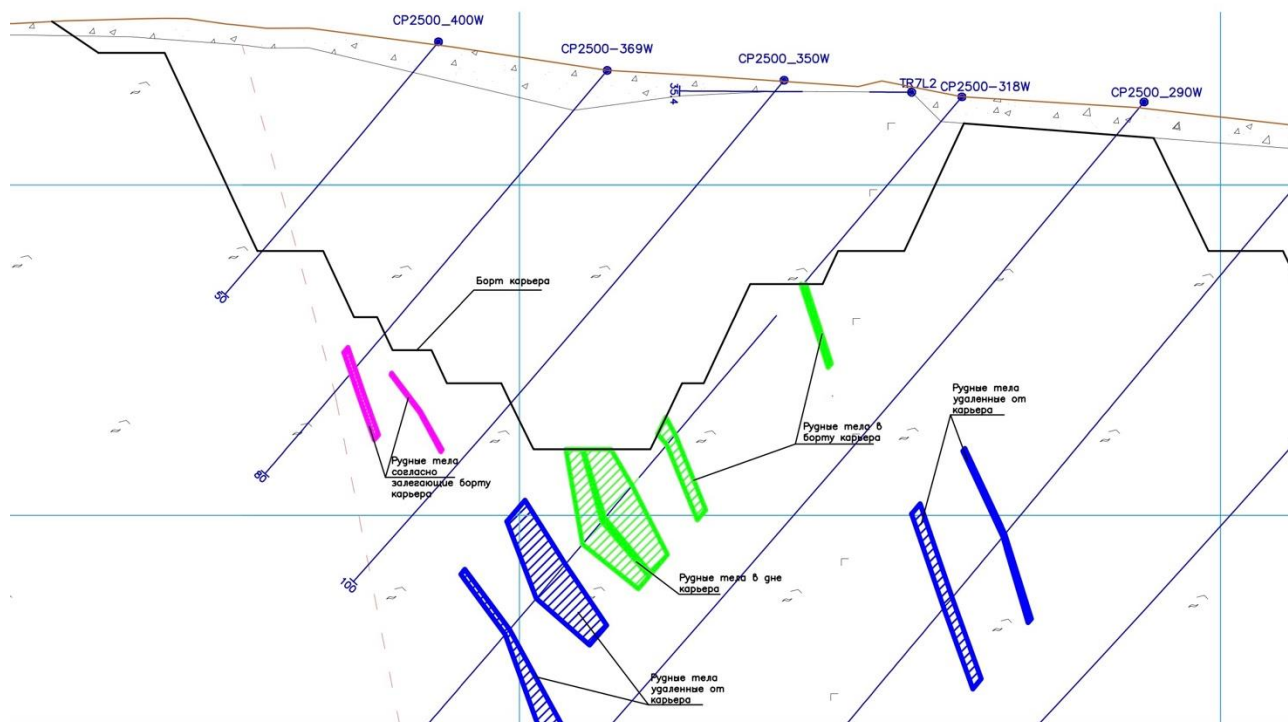


Рис. 1. Условия залегания рудных тел I варианта
Fig. 1. Occurrence conditions of ore bodies (variant I)



Рис. 2. Условия залегания рудных тел II варианта
Fig. 2. Occurrence conditions of ore bodies (variant II)

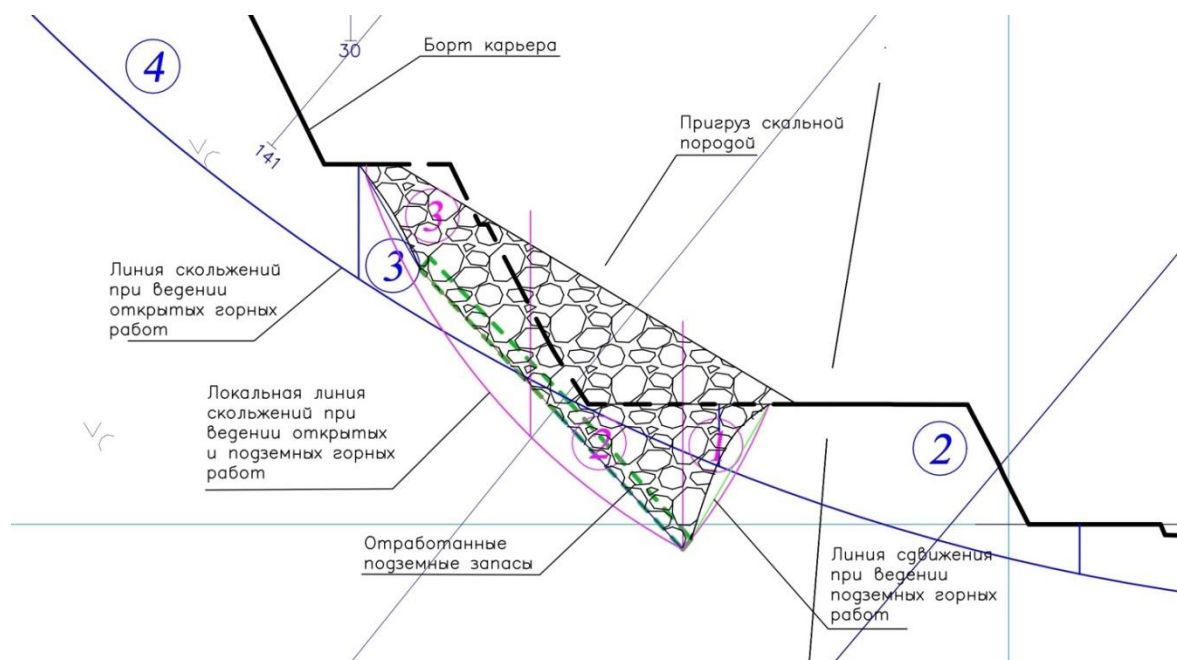


Рис. 3. Построение поверхности скольжения для I варианта при согласном падении рудного тела
Fig. 3. Development of the sliding surface for a concordant-dipping ore body (variant I)

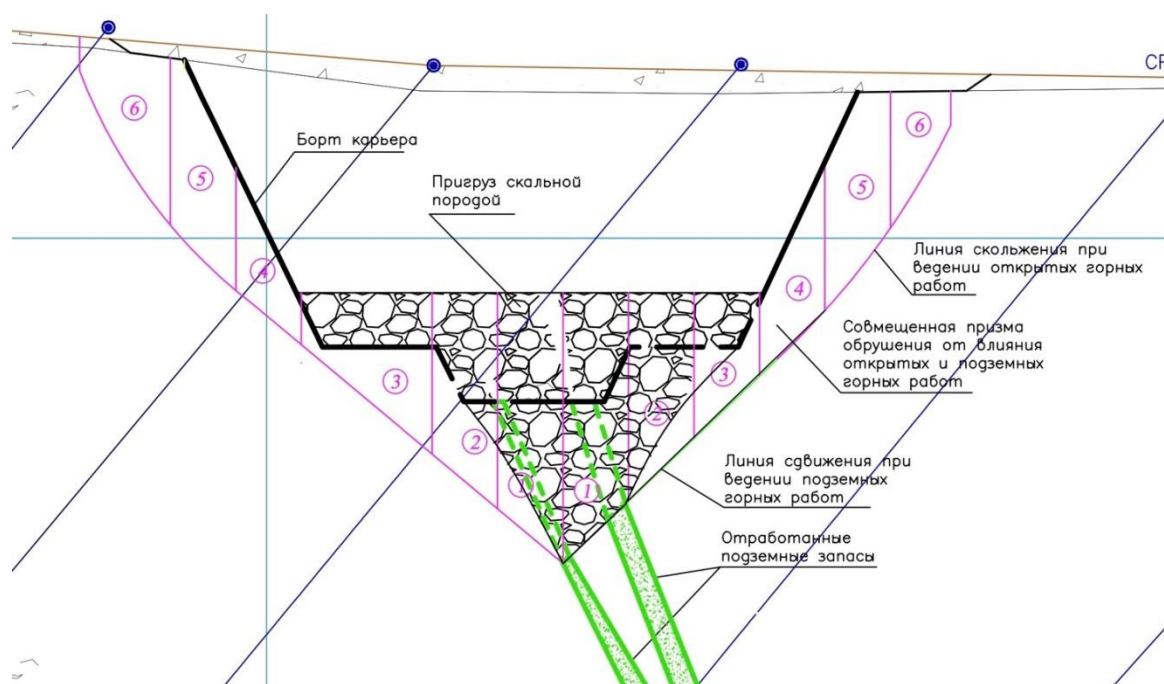


Рис. 4. Построение поверхности скольжения для I варианта при расположении рудного тела в дне карьера
Fig. 4. Development of the sliding surface when the ore body is located at the bottom of the quarry (variant I)

Для II варианта:

1. Выполняется построение поверхности скольжения для подрабатываемого локального участка и рассчитывается по ней коэффициент запаса устойчивости.

2. Соответствие запаса устойчивости локального участка нормативному значению в области отработки барьерного целика означает, что деформаций в этой области не будет, а подземные горные работы не повлияют на общую устойчивость борта. Оценивать ее

не требуется (рис. 6).

3. Выполняется построение поверхности скольжения по контакту пород пригруза и подземных выработок и рассчитывается по ней коэффициент запаса. Если построение поверхности скольжения по контакту пород пригруза и подземных выработок и расчет по ней коэффициента запаса показали, что его значение не соответствует нормативному, необходимо пересмотреть параметры пригруза.

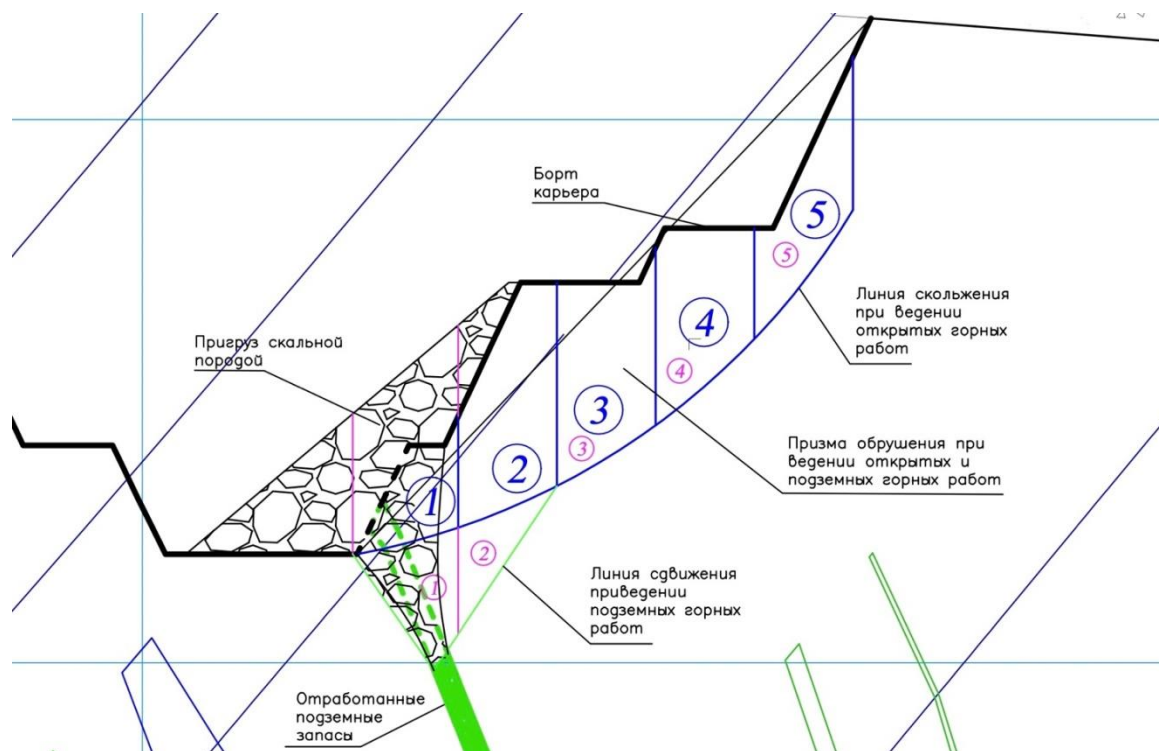


Рис. 5. Построение поверхности скольжения для I варианта при расположении рудного тела в борту карьера
Fig. 5. Development of the sliding surface when the ore body is located at the side of the quarry (variant I)

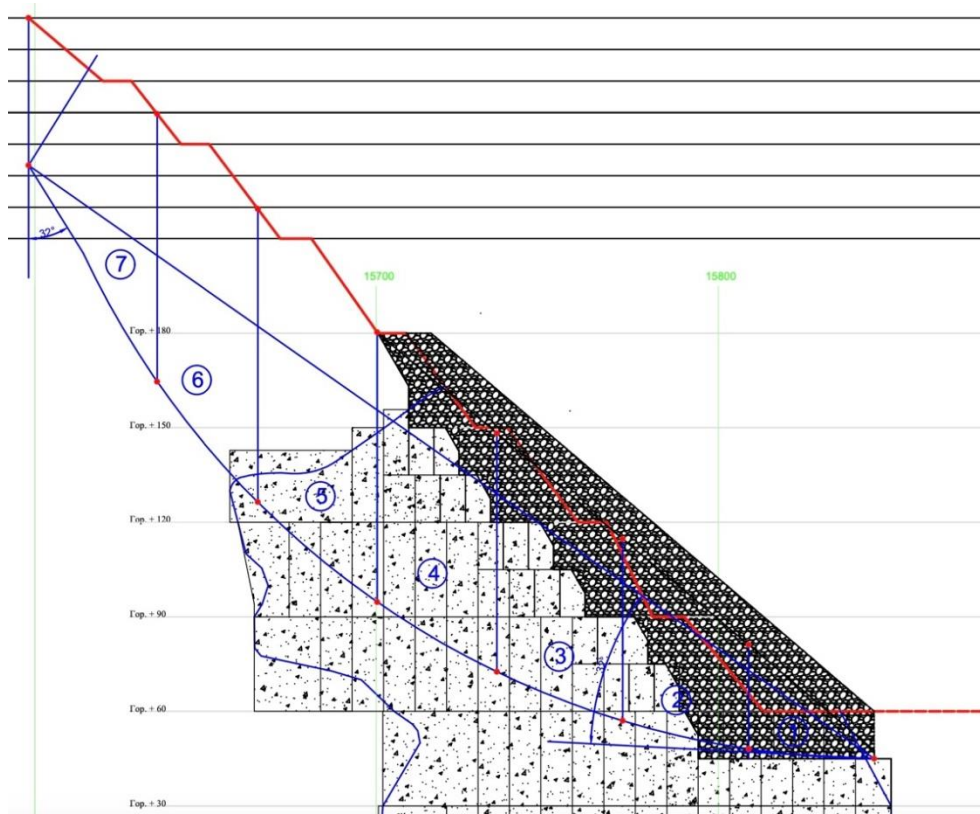


Рис. 6. Построение поверхности скольжения для II варианта
Fig. 6. Development of the sliding surface (variant II)

В первом варианте рассматривается локальная устойчивость элементов борта, а во втором – оценивается устойчивость борта карьера в целом. Основной задачей при оценке устойчивости как в первом, так и во втором варианте является определение положения поверхности скольжения.

В первом варианте построение поверхности скольжения основано на совмещении зон сдвижения от подработки рудных тел малой мощности с поверхностью сдвижения откоса, положение которой задается углом сдвига как на вертикальной площадке, так и в нижней части откоса. Сопряжение двух поверхностей позволяет построить потенциальную поверхность скольжения сложной конфигурации, по которой уже рассчитывается коэффициент запаса устойчивости классическим методом алгебраического сложения сил с учетом изменения физико-механических свойств пород в результате подработки массива.

Во втором случае поверхность скольжения строится по классической методике, основой которой является определение ширины призмы обрушения, высоты вертикального обнажения пород и углов сдвига. В том случае, когда в борту имеется ряд неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, поверхность скольжения может быть криволинейной, переходящей в плоскую, или плоской, переходящей в криволинейную. Данное обстоятельство учитывается при построении поверхностей скольжения по контакту пород пригруза и подземных камер [12].

Заключение

Анализ результатов исследования и проведенных геомеханических расчетов оценки устойчивости откосов бортов карьера показал, что потенциальная поверхность скольжения для подрабатываемого борта имеет сложную конфигурацию, в каждом случае индивидуальную и требующую учета сопряжения возможной призмы обрушения самого борта и зон сдвижения, которые дает отработка рудных тел подземным способом.

Исследования свидетельствуют также о том, что степень влияния подземных работ на устойчивость подрабатываемого массива зависит от мощности бортового целика и его ориентации относительно борта карьера, поэтому в первом варианте рассматривается локальная устойчивость элементов борта, а во втором оценивается устойчивость борта карьера в целом.

В ранее проведенных исследованиях [9-11] установлена конфигурация пространственной формы поверхности деформации. Длина трещины-закола ограничивает размеры деформации откоса по его простирацию. Призма самой деформации симметрична относительно вертикального осевого сечения. Соотношение поперечно-горизонтальных и вертикальных напряжений на различной глубине массива и различном расстоянии от откоса формирует осевую линию скольжения, которая также является дугой окружно-

сти, формирующей поверхность в пространстве. Угол наклона хорды осевой линии скольжения и глубина трещины отрыва определяет высоту призмы скольжения, которая может быть равной высоте откоса, а также больше или меньше ее в зависимости от конкретных условий. В дальнейших исследованиях требуется рассмотреть влияние сил механизма формирования поверхностей сдвижения, проявляющихся от ведения подземных горных работ, на форму поверхности обрушения откоса борта во всех плоскостях ее развития.

В заключение следует отметить, что проделанная работа показала, что в связи с обострившейся необходимостью оценки устойчивости бортов, подработанных подземными горными выработками, возникла потребность в соответствующей методологии, базирующейся на изучении влияния морфологии, условий залегания, способа отработки рудных тел на форму поверхности скольжения подрабатываемых бортов.

Список источников

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 505).
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», утв. приказом Ростехнадзора России от 13.11.2020 № 439.
3. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Кадеров С.С. Оценка устойчивости откосов бортов с учетом реконструкции карьера Светлинского золоторудного месторождения и снижения рисков освоения открыто-подземным способом // Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр: сборник трудов по итогам конференции. Магнитогорск, 2021. С. 27-28.
4. Расчет устойчивости бортов карьера Юбилейного месторождения с помощью программы для ЭВМ «Slope» / Заляднов В.Ю., Великанов В.С., Коваленко Н.В., Кадеров С.С. // Программное обеспечение для предприятий и организаций: сборник трудов Всероссийской научной конференции. Магнитогорск, 2021. С. 8-11.
5. Устойчивость деформированных бортов карьеров: тематическое исследование северного борта Светлинского карьера / Пыталев И.А., Заляднов В.Ю., Габдулхаев Р.К., Семавина Ю.О. // Недропользование и транспортные системы. 2022. Т. 12. №1. С. 33-45.
6. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов / Рыльникова М.В. и др.; Институт проблем комплексного освоения недр. Москва, 2022. 90 с.
7. Закладочные работы в шахтах: справочник/ под ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгалова. М.: Недра, 1989. 400 с.
8. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная технология. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. 560 с.

9. Зинуров А.В. Разработка комбинированной технологии выемки запасов в основании бортов карьеров (на примере медноколчеданных месторождений Урала): дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1999.
10. Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С. Методика цифровой оценки устойчивости бортов карьеров при подземной доработке законтурных запасов // Сб. тр. конф. Москва; Екатеринбург, 2025. С. 127-129.
11. Черчинцева Т.С., Кузнецова Т.С. Геомеханические основы прогноза объемных деформаций и устойчивости откосов горных пород: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. 60 с.
12. Кузнецова Т.С. Обоснование параметров карьеров при комбинированной разработке крутопадающих месторождений: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2009. 112 с.
5. Pytalev I.A., Zalyadnov V.Yu., Gabdulkaev R.K., Semavina Yu.O. Stability of deformed sides of quarries: a case study of the northern side of the Svetlinsky quarry. Nedropolzovanie i transportnye sistemy [Subsoil use and transport systems]. 2022;12(1):33-45. (In Russ.)
6. Rylnikova M.V. et al. Metodicheskie ukazaniya po otsenke riskov razvitiya deformatsiy, monitoringu i upravleniyu ustoichivostyu bortov i ustupov, karerov, razrezov i otkosov otvalov. Metodicheskie ukazaniya [Methodological guidelines for assessing the risks of deformation development, monitoring and managing the stability of sides and ledges, quarries, sections and slopes of dumps. Methodological guide book]. Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources. Moscow, 2022, 90 p. (In Russ.)
7. Bronnikov D.M., Tsygalov M.N. Zakladochnye raboty v shahtah: Spravochnik [Stowing works in mines: A reference book]. Moscow: Nedra, 1989, 400 p. (In Russ.)
8. Kaplunov D.R., Kalmykov V.N., Rylnikova M.V. Kombinirovannaya tekhnologiya [Combined technology]. Moscow: Ruda i Metally Publishing House, 2003, 560 p. (In Russ.)
9. Zinuurov A.V. Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii vyemki zapasov v osnovanii bortov karerov (na primere mednokolchedannykh mestorozhdeniy Urala): dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a combined technology for extracting reserves at the base of quarry backs (based on copper-sulfide deposits in the Urals). PhD dissertation]. Magnitogorsk, 1999.
10. Kalmykov V.N., Mazhitov A.M., Kravchuk T.S. Methodology of digital assessment of stability of quarries sides at underground refining of the reserves of the contour. Sb. trudov konf. [Proceedings of the conference]. Moscow, Yekaterinburg, 2025, pp. 127-129. (In Russ.)
11. Cherkintseva T.S., Kuznetsova T.S. Geomekhanicheskie osnovy prognoza obemnykh deformatsiy i ustoichivosti otkosov gornykh porod. Monografiya [Geomechanical foundations of forecasting volumetric deformations and stability of rock slopes. Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2007, 60 p. (In Russ.)
12. Kuznetsova T.S. Obosnovanie parametrov karerov pri kombinirovannoy razrabotke krutopadayushchikh mestorozhdeniy. Monografiya [Substantiation of quarry parameters in the combined development of steep-falling deposits. Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2009, 112 p. (In Russ.)

References

1. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for mining and processing of solid minerals" (Order of Rostekhnadzor No. 505 dated December 08, 2020).
2. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps", approved by Order of Rostekhnadzor of Russia No. 439 dated November 13, 2020.
3. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Kaderov S.S. Assessment of the stability of the sides slopes, taking into account the reconstruction of the Svetlinsky gold deposit quarry and reducing the risks of development by the open-underground method. Sb. trudov po itogam konferentsii «Kombinirovannaya geotekhnologiya: riski i globalnye vyzovy pri osvoenii i sohranении neдр [Combined geotechnology: risks and global challenges in the development and conservation of mineral resources. Proceedings]. Magnitogorsk, 2021, pp. 27-28. (In Russ.)
4. Zalyadnov V.Yu., Velikanov V.S., Kovalenko N.V., Kaderov S.S. Calculation of the stability of the sides of the mining field using the computer program "Slope". Sb. trudov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Programmnoe obespechenie dlya predpriyatiy i organizatsiy» [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference Software for enterprises and organizations]. Magnitogorsk, 2021, pp. 8-11. (In Russ.)

Поступила 24.11.2025; принята к публикации 10.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 24/11/2025; revised 10/12/2025; published 25/12/2025

Калмыков Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: prmpi@magtu.ru ORCID 0009-0007-8631-5343

Мажитов Артур Маратович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: artur.mazhitov@yandex.ru ORCID 0000-0001-8219-4264

Кравчук Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия.
Email: kravchukts@susu.ru. ORCID 0000-0002-2795-3843

Зотеев Олег Вадимович – доктор технических наук, профессор,
Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: zoteev.o@mail.ru. ORCID 0009-0003-8521-0372

Vyacheslav N. Kalmykov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: prmpi@magtu.ru ORCID 0009-0007-8631-5343

Artur M. Mazhitov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: artur.mazhitov@yandex.ru ORCID 0000-0001-8219-4264

Tatiana S. Kravchuk – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: kravchukts@susu.ru. ORCID 0000-0002-2795-3843

Oleg V. Zoteev – DrSc (Eng.), Professor,
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: zoteev.o@mail.ru ORCID 0009-0003-8521-0372