

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
«Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А Байконурова

Кафедра «Горное дело»

Қамбаров Ғани Ермекұлы

«Влияние взрывных работ на устойчивость бортов карьера»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07203 – «Горная инженерия»

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
«Казакский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А Байконурова

УДК 622.271

На правах рукописи

Қамбаров Ғани Ермекулы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации «Влияние взрывных работ на устойчивость бортов карьера»

Направление подготовки 7M07203 – «Горная инженерия»

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Молдабаев С.К.
«16» 06 2025 г.

Рецензент
канд. техн. наук
Сарыбаев М.А.
«16» 06 2025 г.

Нормоконтролер
ведущий инженер
Мендекинова Д.С.
«12» 06 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им. К.И. Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ГД,
д-р техн. наук, профессор
Молдабаев С.К.
«16» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
«Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева»

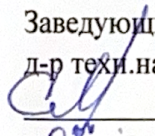
Горно-металлургический институт имени О.А Байконурова

Кафедра «Горное дело»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой ГД,

д-р техн.наук, профессор

 Молдабаев С.К.

«08» 01 2025 г.

ЗАДАНИЕ

На выполнение магистерской диссертации

Магистрант: Камбаров Фани Ермекулы

Тема: «Влияние взрывных работ на устойчивость бортов карьера»

Утверждена приказом ректора университета №548-ПӨ от «4» декабря 2023г.

Срок сдачи законченной диссертации: « » 2025г.

Исходные данные к магистерской диссертации: ТОО «Казминералз Актогай», план горных работ месторождения «Актогай», Том-2, 2023г.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Анализ технологии буровзрывных работ на месторождении «Актогай»;

б) Анализ влияния буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера;

в) Разработка рекомендаций по оптимизации буровзрывных работ при контурном взрывании;

г) Проведение анализа по постановке откосов в конечное положение.

Перечень графических материалов (с точным указанием обязательных чертежей):

а) представлены 12 слайдов презентации работы;

б) чертежи объекта исследования (геологические разрезы и планы карьеров рудника);

в) чертежи горнотехнических работ (паспорта отработки уступов с расчетами ширины рабочей площадки);

г) результаты расчетов показателей эффективных методов (таблицы, графики зависимостей и т.д.).

Рекомендуемая основная литература:

а) Review of machine learning application in mine blasting // Journal of Geosciences, 2023;

б) Zairov, S. Sh., Urinov, Sh. R., Nomdorov, R. U. Ensuring Wall Stability in the Course of Blasting at Open-Pits of Kyzyl Kum Region // Mining Science and Technology. — 2020. — Vol. 5(3). — pp. 235–252;

в) Bamford, T., Medinac, F. & Esmaili, K. Continuous Monitoring and Improvement of the Blasting Process in Open Pit Mines Using Unmanned Aerial Vehicle Techniques // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12(17), 2801.

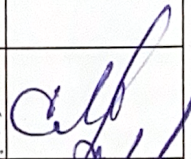
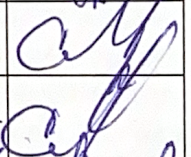
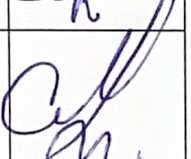
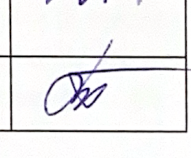
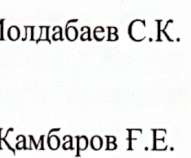
г) The use of the blastability index in the design of blasts for open pit mine, P.A. Lilly, 1986.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

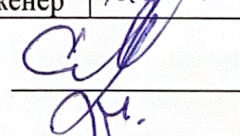
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечания
Обзор на геологическую и геомеханическую структуру месторождения «Актогай»	14.12.2023 г.	
Анализ технологии буровзрывных работ на месторождении «Актогай»	01.04.2024 г.	
Анализ влияния буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера	17.04.2025 г.	
Разработка рекомендаций по оптимизации буровзрывных работ при контурном взрывании и по постановке откосов в конечное положение	13.04.2025 г.	

ПОДПИСИ

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Даты подписания	Подпись
Обзор на геологическую и геомеханическую структуру месторождения «Актогай»	С.К. Молдабаев, профессор	12.06.25	
Анализ технологии буровзрывных работ на месторождении «Актогай»	С.К. Молдабаев, профессор	12.06.25	
Анализ влияния буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера	С.К. Молдабаев, профессор	12.06.25	
Разработка рекомендаций по оптимизации буровзрывных работ при контурном взрывании и по постановке откосов в конечное положение	С.К. Молдабаев, профессор	12.06.25	
Нормоконтролер	Д.С. Мендекинова, ведущий инженер	12.06.25	

Научный руководитель

 Молдабаев С.К.

Задание принял к исполнению обучающийся

 Камбаров Ф.Е.

Дата

«03» 01 2025 г.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации рассматривается влияние буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера и разрабатываются меры по минимизации негативного воздействия взрыва на устойчивость откосов. Объектом исследования является карьер Актогайского медно-порфирового месторождения, отличающийся сложными инженерно-геологическими условиями.

В ходе работы проведён комплексный анализ параметров буровзрывных работ, геомеханических свойств массива горных пород, а также выполнено численное моделирование распространения сейсмических волн и их влияния на устойчивость откосов. Результаты исследования подтверждают, что чрезмерная интенсивность и нерациональные параметры взрывов способствуют снижению коэффициента устойчивости, особенно в зонах с развитой трещиноватостью и высоким уровнем обводнения. На основании полученных данных разработаны рекомендации по оптимизации параметров взрывов и внедрению систем мониторинга с целью повышения безопасности и эффективности ведения горных работ.

АНДАТПА

Бұл магистрлік диссертацияда жарылыс жұмыстарының карьер борттарының тұрақтылығына әсері қарастырылып, жарылыс салдарынан туындайтын теріс әсерді азайту бойынша шаралар ұсынылады. Зерттеу нысаны – инженерлік-геологиялық жағдайы күрделі Актоғай мыс-порфирлі кен орнының карьері.

Жұмыс барысында жару жұмыстарының параметрлері, тау жыныстары массивінің геомеханикалық қасиеттері жан-жақты талданып, сейсмикалық толқындардың таралуы мен олардың беткейлердің тұрақтылығына әсері сандық модельдеу арқылы зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, жару жұмыстарының шамадан тыс қарқындылығы мен дұрыс таңдалмаған параметрлері тұрақтылық коэффициентінің төмендеуіне әкеледі, әсіресе жарықтар жиі кездесетін және суланған аймақтарда. Жұмыстың нәтижесінде жару параметрлерін оңтайландыру және мониторинг жүйелерін енгізу арқылы тау-кен жұмыстарының қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған ұсыныстар жасалды.

ABSTRACT

This master's thesis examines the impact of blasting operations on the stability of open pit slopes and proposes measures to minimize the negative effects of blasting. The case study focuses on the Aktogay porphyry copper deposit, characterized by complex engineering-geological conditions.

The research includes a comprehensive analysis of blasting parameters, geomechanical properties of the rock mass, and numerical modeling of seismic wave propagation and its effect on slope stability. The results confirm that excessive blasting intensity and poorly optimized parameters contribute to a reduction in the factor of safety, particularly in areas with high fracturing and water saturation. Based on the findings, recommendations are developed for optimizing blasting designs and implementing monitoring systems to enhance the safety and efficiency of mining operations.

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	7
1	Общие сведения. Физико-географическое и геологическое описание объекта исследования	9
1.1	Географо-экономические условия месторождения	9
1.2	Геологическое строение месторождения	13
1.3	Инженерно-геологические и горнотехнические условия месторождения	15
1.4	Геомеханические условия месторождения	17
2.	Особенности горных работ на месторождении «Актогай»	20
2.1	Вскрытие и развитие горных работ на месторождении	20
2.2	Выбор системы разработки месторождения	22
2.3	Ведение горных работ в карьере	23
2.4	Технология буровзрывных работ	24
2.5	Ведение буровзрывных работ на проектном контуре карьера	32
2.6	Геотехнические рекомендации по ведению буровзрывных работ на проектном контуре	38
3.	Анализ влияния буровзрывных работ на устойчивость борта карьера на примере месторождения «Актогай»	52
3.1	Сравнительный анализ проектного и фактического положения борта	52
	Выводы по третьей главе	57
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Современное горное производство сопровождается все более сложными геотехническими и техногенными условиями, особенно при ведении открытых горных работ на крупных месторождениях. Одной из приоритетных задач при разработке карьеров является обеспечение устойчивости бортов, от которой напрямую зависит безопасность, эффективность и продолжительность эксплуатации горнодобывающего объекта. Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на устойчивость откосов карьеров, являются буровзрывные работы.

Несмотря на широкое применение современных технологий взрывания, зачастую их неправильное проектирование или исполнение может привести к дестабилизации массива, образованию трещин, ускорению процессов обрушения и оползней, особенно в зонах с повышенной трещиноватостью и обводненностью. В связи с этим, актуальность оценки и минимизации негативного влияния взрывов на устойчивость бортов карьера особенно возрастает.

Объект исследования — карьер Актогайского медно-порфирового месторождения.

Предмет исследования — влияние параметров буровзрывных работ на устойчивость откосов карьера и геомеханическое поведение массива горных пород.

Цель работы — исследование воздействия буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера и разработка рекомендаций по оптимизации параметров взрыва с целью повышения безопасности горных работ.

Научная новизна:

1) Разработаны практические рекомендации по оптимизации параметров буровзрывных работ (в том числе схемы щадящего контурного взрывания), направленные на снижение степени деструкции откосов и увеличение их устойчивости в условиях трещиноватых и ослабленных зон;

2) Обоснована эффективность применения предварительного щелеобразования в качестве способа минимизации влияния взрывной нагрузки на массив горных пород, ограничивающий развитие трещин за пределами расчетного контура.

Методы исследования: В работе использовался комплексный подход, включающий анализ геомеханических свойств массива, параметры буровзрывных работ, инструментальные наблюдения, анализ выявленных отклонений фактического положения бортов от проектных параметров с целью определения степени влияния буровзрывных работ на деформационные процессы.

Задачи исследования:

1) Анализ существующих параметров буровзрывных работ на карьере Актогай;

2) Исследование геомеханических характеристик массива в пределах рабочих откосов и рекомендация на БВР;

3) Моделирование воздействия взрывной сейсмической волны на устойчивость откосов.

Личный вклад автора:

1) Выполнен анализ действующих буровзрывных параметров на карьере Актогай;

2) Проведен анализ отклонении фактического положения бортов от проектных параметров с целью определения степени влияния буровзрывных работ на деформационные процессы.;

3) Разработаны предложения по снижению негативного влияния взрывов на борта карьера.

Публикации и апробация работы:

Научная статья на тему «Метод предварительного щелеобразования» представлена на международной конференции «Satbayev International Conference – 2025»

1 Общие сведения. Физико-географическое и геологическое описание объекта исследования

1.1 Географо-экономические условия месторождения

Объектом исследования данной магистерской диссертации является карьер медно-порфирового месторождения «Актогай», который изображен на рисунке 1.1.

Актогайский рудник — один из крупнейших проектов по добыче меди на территории СНГ показано на рисунке 1.1. Разработка месторождения осуществляется компанией KAZ Minerals. Карьер расположен в Абайской области Республики Казахстан, вблизи границы с Жетысуской областью. Общие запасы руды составляют 1 719 млн тонн при среднем содержании меди 0,33 %, что определяет стратегическую важность объекта для национальной горнодобывающей отрасли.

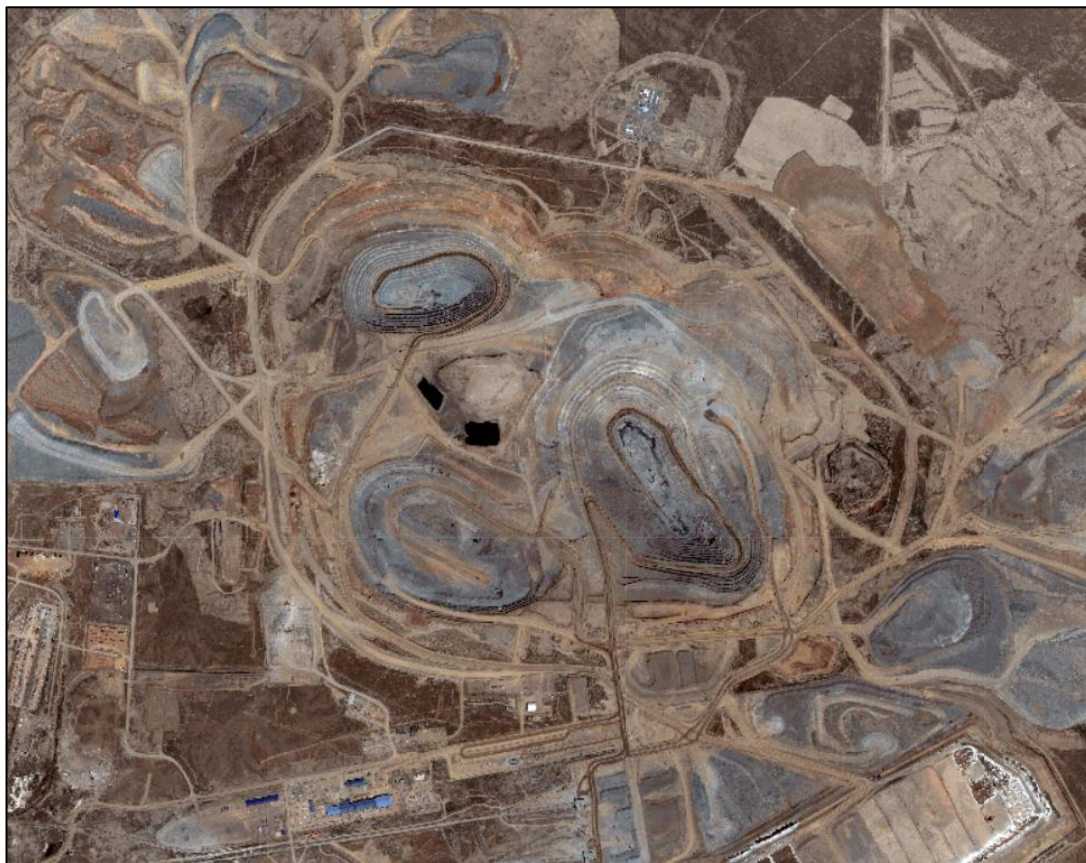


Рисунок 1.1 – Карьер Актогайского ГОК

Проект Актогайского горно-обогатительного комбината (ГОК) включает в себя добычу и переработку руд, а также строительство соответствующей инфраструктуры. Минеральная база представлена двумя типами руд: окисленными, залегающими в верхней части, и сульфидными,

расположенными ниже. Сульфидные руды, помимо меди, содержат молибден в качестве полезного попутного компонента. Ожидаемый срок эксплуатации объекта превышает 50 лет.

Ключевая задача проекта — расширение ресурсной базы компании «KAZ Minerals» и наращивание объемов выпуска медного концентрата. Это позволит компании сохранить конкурентные позиции среди мировых лидеров медедобычи. Актогайское месторождение, благодаря значительным запасам, способно обеспечить сырьевую стабильность компании более чем на семь десятилетий и послужить платформой для устойчивого развития в регионе.

Кроме того, Актогай предоставляет потенциал для стратегического сотрудничества с инвесторами, что создаёт дополнительные каналы сбыта продукции, в том числе за пределами внутреннего рынка. Учитывая выгодное местоположение — вблизи китайской границы, — появляется возможность удовлетворять растущий спрос Китая на медь при низких логистических издержках.

В рамках проекта особое внимание уделяется социальному развитию Аягозского района. Предусмотрено строительство социальных объектов: детского сада, пришкольного интерната, капитальный ремонт медицинских учреждений, создание Дома детского творчества и модернизация инфраструктуры. В общей сложности на социальные инициативы компанией «KAZ Minerals» было направлено 780,5 млн тенге.

Проект промышленной разработки предполагает переработку как окисленных, так и сульфидных руд. Из окисленных руд методом кучного выщелачивания производится катодная медь (до 25 тыс. т/год), а переработка сульфидных руд (до 25 млн т/год) осуществляется на местной обогатительной фабрике. В результате получают медный концентрат (около 400 тыс. т/год) и молибденовый концентрат (примерно 4,5 тыс. т/год), доставляемые железнодорожным транспортом к потребителям.

Технологическая часть проекта опирается на передовые решения в области добычи и переработки полезных ископаемых. Обогатительная фабрика оснащена современным оборудованием, включая циклы дробления, измельчения, флотации и фильтрации, обеспечивающие высокую степень извлечения ценных компонентов. Взрывные работы проводятся с применением высокоэффективных буровзрывных технологий, в том числе контурного и предварительного щелеобразующего взрывания, с целью обеспечения устойчивости откосов и минимизации негативного влияния на окружающую среду.

Месторождение расположено в пределах Аягозского района Абайской области, схема расположения изображено на рисунке 1.2. Недалеко от транспортных и энергетических узлов, что обеспечивает высокую логистическую доступность. Оно находится всего в 25 км от станции Актогай, соединённой с объектом асфальтированной дорогой II класса и имеющей выход на трассу Алматы – Усть-Каменогорск.



Рисунок 1.2 – Схема расположения месторождения Актогай

Близость к железнодорожной ветке, ведущей к станции Достык на границе с Китаем, обеспечивает прямой доступ к международным рынкам, что значительно повышает экономическую привлекательность разработки месторождения и оптимизирует логистику поставок продукции, оборудования и материалов.

Географическое положение района предопределяет его климатические и природные особенности. Регион характеризуется резко континентальным климатом: зима холодная и продолжительная, с устойчивыми отрицательными температурами и сильными ветрами; лето жаркое и сухое. Среднегодовая температура воздуха составляет около $+6^{\circ}\text{C}$, при этом летом температура может достигать $+40^{\circ}\text{C}$, а зимой опускаться до -35°C . Годовое количество осадков в среднем не превышает 227 мм, большая часть которых приходится на летне-осенний период, преимущественно в виде кратковременных, но интенсивных ливней. Такие климатические условия создают сложности при строительстве и эксплуатации объектов, особенно в весенне-осенние периоды, сопровождающиеся резкими перепадами температур и высокой испаряемостью влаги.

Территория месторождения преимущественно равнинная, с незначительными колебаниями рельефа, представленными чередованием пологих холмов, слабовыраженных водоразделов и понижений, занятых солёными озёрами, старыми руслами рек и такырами. Поверхностные почвы маломощные, часто засоленные, слабо развитые, на большей части площади

отсутствует устойчивый растительный покров. В геологическом строении участвуют в основном коренные интрузивные и вулканогенные породы, выходящие на дневную поверхность или покрытые тонкой толщей делювиальных и элювиальных отложений.

Грунтовые воды залегают на небольшой глубине, в интервале от 3 до 15 метров, и обладают слабой минерализацией (в среднем до 1 г/л). Несмотря на это, они характеризуются агрессивным воздействием на бетонные и железобетонные конструкции, что требует применения специальных инженерных решений при проектировании фундаментов и подземных сооружений.

С начала недропользования в 2004 году компания ТОО «Корпорация Казахмыс» провела значительный объем подготовительных и инфраструктурных работ. Были выполнены геологоразведочные изыскания, построены линии электропередачи (ЛЭП), временные и постоянные подъездные автомобильные дороги, железнодорожная ветка для отгрузки концентрата. Также была организована производственная инфраструктура: вахтовый жилой поселок, трансформаторные подстанции, склады, ангары, ремонтно-механические мастерские и административно-бытовые корпуса. Эти мероприятия заложили основу для последующего промышленного освоения месторождения и его стабильного функционирования.



Рисунок 1.3 – Схема производственной площадки

1.2 Геологическое строение месторождения

Месторождение Актогай представляет собой типичный объект медно-порфировой геолого-промышленной формации, принадлежность к которой подтверждена многочисленными геолого-структурными, минералогическими и геофизическими исследованиями. Его формирование связано с кольцевыми штокверковыми структурами, характерными для данной формации, и генетически сопоставимо с аналогичными месторождениями Коунрад и Алмалык.

Геолого-структурное положение, морфология штокверка, его внутреннее строение, состав руд и изменение вмещающих пород по метасоматозу демонстрируют высокую степень сходства с типичными представителями медно-порфировой формации Центральной Азии. Латеральная концентрическая зональность минерализации (медная, молибденовая, свинцово-цинковая) ярко выражена, как и закономерное снижение содержания меди и молибдена с глубиной.

Месторождение приурочено к восточной части вулканического глубинного пояса, тянущегося вдоль северной части озера Балхаш. Этот пояс включает ряд крупных медно-порфировых объектов, таких как Коунрад, разрабатываемый с 1934 года. Геологическая карта, рисунок 1.4 отображает протяженность пояса и размещение ключевых месторождений медно-порфирового, молибдено-порфирового и скарнового типов.

В геологическом отношении месторождение считается простым. В его основе лежит Колдарский интрузивный массив, представленный диоритами и гранодиоритами, формирующими лакколит с характерной линзовидной формой, вытянутой в субширотном направлении (размеры $17 \times 4-8$ км, площадь — около 75 км^2). Поднятие магматического тела сформировало горст-антиклиналь, над которой позже образовалась кальдероподобная структура — Центрально-Актогайский ксенолит, выполненный вулканогенно-осадочными породами кергетасской свиты мощностью до 600 м.

По данным грави-, магнито- и сейсморазведки (МОВ), массив имеет корневую часть, уходящую на глубину до 4,7 км, и развитые подводящие каналы. Центральная часть лакколита содержит более кислые фации, предположительно гранодиоритового состава, которые на глубине до 1 км занимают до 58 км^2 . Гранитные тела локализованы в северной части массива и не имеют чёткой корневой зоны.

Разломы актогайского (290°) и икбассского (60°) направлений определили структурный контроль размещения магматических и рудоносных тел. Месторождения Актогай и Айдарлы сосредоточены в зоне актогайского разлома, тогда как Кызылкия — в зоне разлома икбассского направления.

Геофизические исследования и литогеохимические работы подтверждают наличие выраженной кольцевой структуры рудного поля. В пределах массива также выделяются малые интрузивные тела и дайки

различного состава — от гранитоидных до диабазовых и андезитовых порфиритов, относящихся к более поздним (возможно пермским) этапам магматизма.

Картографирование района велось в разные годы и в различных масштабах: 1:200000 (1958–1979 гг.), 1:50000 (1976 г.), 1:10000 (1975–1978 гг.), 1:2000 (Актогайская ГРП, 1975–1979 гг.) с последующей трансформацией до масштаба 1:5000. Использовались материалы аэрофотосъёмки, космоснимков и дешифрирования, а также результаты каротажных, геохимических и геофизических исследований, включая методы ВП, КМВ, ГК, рентген-радиометрии, сейсмоакустики и фототелевизионного каротажа.

Эти работы проводились ведущими научно-исследовательскими организациями Советского Союза, в том числе Казахским научно-исследовательским институтом минерального сырья (КазНИИМС), Институтом минеральных ресурсов (ИМГРЭ), Центральным научно-исследовательским геологоразведочным институтом цветных металлов (ЦНИГРИ), а также рядом других специализированных учреждений. Активная фаза исследований пришлась на 1975–1979 годы, в течение которых был собран и обобщён обширный массив данных, легший в основу последующих этапов оценки запасов и проектирования промышленной эксплуатации месторождения.

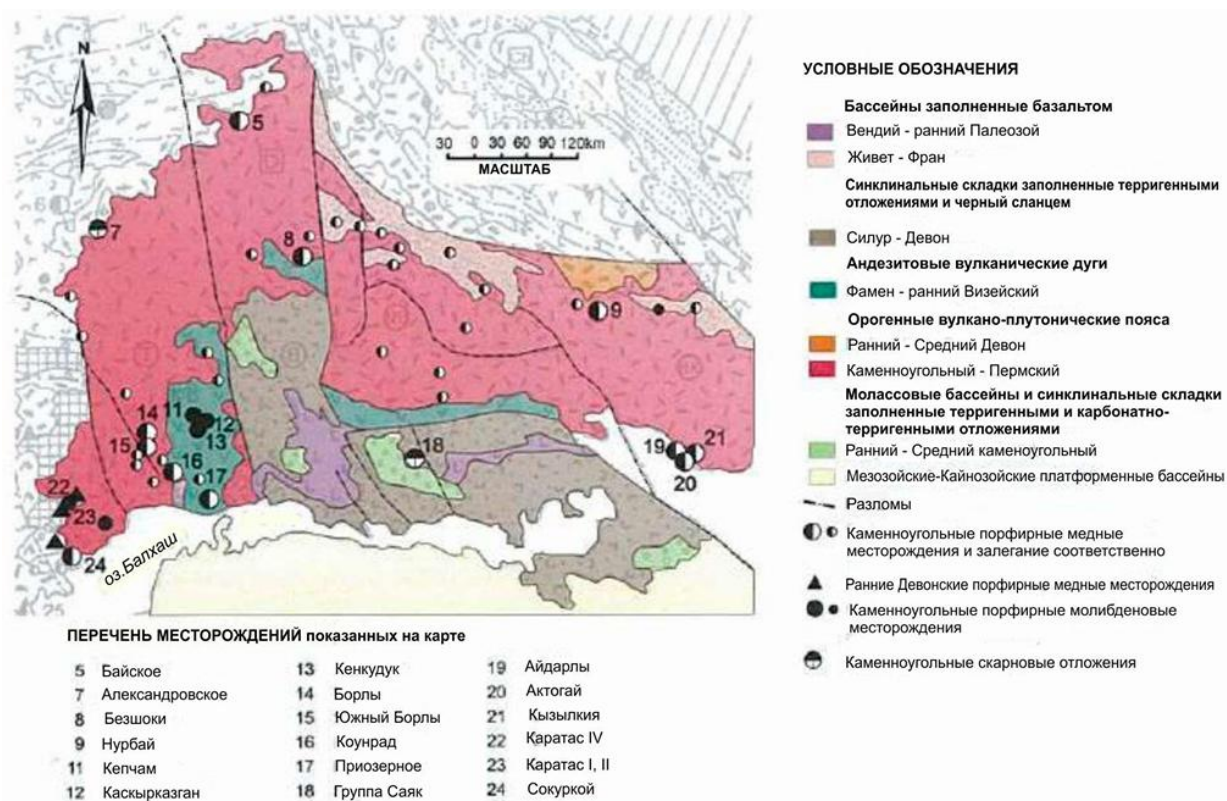


Рисунок 1.4 – Схематическая геологическая карта Балхашского вулканического глубинного пояса (по Кудрявцеву, 1996 г.)

1.3 Инженерно-геологические и горнотехнические условия месторождения

Актогайский горнорудный район расположен между Балхаш-Алакульской впадиной и хребтом Тарбагатай, в пределах Северо-Восточного Прибалхашья. Регион характеризуется мелкосопочником и аккумулятивно-денудационными равнинами. Абсолютные высоты варьируются от 356 м (район урочища Келы) до 470 м (гора Колдар).

С точки зрения тектоники район входит в пределы Баканасского синклинория, являющегося частью Джунгаро-Балхашской складчатой системы. Колдарский горный массив представляет собой горст-антиклиналь, протягивающуюся в субширотном направлении на 35 км при ширине 10–12 км. Он приурочен к южному крылу синклинория и ограничен с севера и северо-запада выраженным Колдарским разломом, имеющим дугообразную форму, обращённую вогнутой стороной к югу. На востоке массив граничит с Чинрауской синклиналью, а на юге и юго-востоке переходит во впадину, заполненную отложениями мезозойского и кайнозойского возраста.

Инженерно-геологические условия разработки Актогайского месторождения формируются под влиянием метасоматически изменённых вулканогенных и интрузивных пород, рассечённых сериями тектонических разломов преимущественно субширотного простирания. Осадочно-вулканогенные вмещающие породы залегают в виде остаточных фрагментов кровли над интрузивными телами. Эти породы представлены туфами, туфолавами и лавами среднего и кислого состава.

Геологическое строение характеризуется высокой степенью сложности, проявляющейся в пространственном чередовании пород и затруднённой дифференциации контактов ввиду схожих физико-химических свойств вулканогенных и интрузивных пород. В зоне тектонических нарушений развиты многочисленные участки брекчий различного возраста, разделяющих массив на блоки с отличающимися структурно-механическими характеристиками. Это позволяет подразделить скальный массив на инженерно-геологические участки с однородными свойствами — в первую очередь, по трещиноватости и прочностным параметрам.

Все породы, вскрытые в процессе изысканий, были условно разделены на две группы по прочности на одноосное сжатие:

- 1) Крепкие породы, с пределом прочности выше 800 кг/см²;
- 2) Породы средней крепости, с пределом прочности менее 800 кг/см².

На основании генезиса, условий залегания и физико-механических свойств пород в пределах месторождения выделены шесть инженерно-геологических комплексов:

Интрузивные породы среднего состава: мелко- и среднезернистые диориты, кварцевые диориты и порфировидные диориты. Этот комплекс преобладает на периферии месторождения, занимая около 50% его площади.

По данным 167 проб: удельный вес — 2,75 г/см³, объемный — 2,69 г/см³, пористость — 2,01%. Прочность на сжатие — от 220 до 2632 кг/см², в среднем — 1176 кг/см²; прочность на растяжение — 75–85 кг/см²; угол внутреннего трения — 34°, сцепление — 282 кг/см².

Интрузивные породы кислого состава: гранодиориты и гранодиорит-порфиры. Распространены в центральной и восточной частях. По 23 пробам: удельный вес — 2,71 г/см³, объемный — 2,65 г/см³, прочность на сжатие — 1325 кг/см², на растяжение — 80 кг/см².

Осадочно-вулканогенные породы: лавы, туфолавы и туфы кислого и среднего состава, распространены в центре и на западе. По 88 пробам: удельный вес — 2,72 г/см³, варьируя от 2,63 до 2,88 г/см³; прочность на сжатие — 1460 кг/см², на растяжение — 102 кг/см²; угол внутреннего трения — 37°, сцепление — 306 кг/см².

Дайковые тела: андезитовые и диабазовые порфириты мощностью от 1–5 до 20–30 м, распространены повсеместно. Удельный вес — 2,70 г/см³, объемный — 2,67 г/см³. Обладают высокой прочностью на растяжение — 1240 кг/см², при сравнительно умеренной прочности на сжатие — 953 кг/см².

Таблица 1.1 – Инженерно-геологические группы пород

Инженерно-геологические группы пород	Типы инженерно-геологических участков	Названия пород и характер изменения	Предел прочности, кгс/см ²	Модуль трещиноватости, тр/м	Модуль кусковатости, тр/м столб/м	Процент выхода столбиков, %
Вторая (средней крепости)	I. Весьма неустойчивые	Зона поверхностного выветривания пород	500-600	более 30	0-3	0-10
	II. Неустойчивые	Зоны тектонических нарушений и повышенной трещиноватости пород	500-700	15-30	5-8	10-40
Первая (крепкие)	III. Относительно устойчивые	Измененные гранитоиды и осадочно-вулканогенные породы	1100-1300	8-15	7-10	40-90
	IV. Устойчивые	Неизмененные и слабо измененные гранитоиды	1200-1500	0-7	7-10	40-90

1.4 Геомеханические условия месторождения

В процессе геомеханического изучения месторождения Актогай были выделены шесть инженерно-геологических комплексов пород, различающихся по литологическому составу, прочностным характеристикам, степени трещиноватости и другим геомеханическим показателям.

Комплекс интрузивных пород среднего состава представлен мелко- и среднезернистыми диоритами, кварцевыми диоритами и диоритами порфировидными. Породы данного комплекса характеризуются средней плотностью (удельный вес – 2,75–2,69 г/см³, пористость – 2,01%) и прочностью при сжатии в пределах 220–2632 кгс/см² (в среднем – 1176 кгс/см²). Прочность при растяжении составляет 75–85 кгс/см². Угол внутреннего трения достигает 34°, сцепление – 282 кгс/см².

1) Комплекс интрузивных пород кислого состава (гранодиориты, гранодиорит-порфиры) развит в центральной и восточной частях месторождения. Отличается более высокими прочностными характеристиками: прочность при сжатии до 1325 кгс/см², при растяжении – до 80 кгс/см².

2) Комплекс осадочно-вулканогенных пород включает лавы, туфолавы, туфы кислого и среднего состава. Плотность пород 2,63–2,88 г/см³, средняя прочность на сжатие – 1460 кгс/см², на растяжение – 102 кгс/см². Угол внутреннего трения – 37°, сцепление – 306 кгс/см².

3) Комплекс даек андезитов и диабазовых порфиритов развит повсеместно, толщина тел – от 1–5 м до 20–30 м. Удельный вес – 2,70 г/см³, объёмный вес – 2,67 г/см³.

4) Комплекс литифицированных брекчий представлен плотными, слаботрещиноватыми породами. Удельный вес – 2,75 г/см³, объёмный – 2,71 г/см³. Прочность на сжатие – 967 кгс/см², на растяжение – 81 кгс/см².

5) Комплекс осадочных пород (песчаники, гравелиты, конгломераты) развит в юго-восточной части и зоне рудного штокверка. Обладает меньшей плотностью (2,59 г/см³) и большей пористостью (3,74%). Прочность на сжатие – 1230 кгс/см², на растяжение – 119 кгс/см².

Все породы месторождения подразделены на две основные группы:

1) Первая группа (крепкие породы) – включает породы с низкой трещиноватостью и выветрелостью, с пределом прочности на сжатие более 1200 кгс/см², на растяжение – 50–150 кгс/см².

2) Вторая группа (средней крепости) – представлена интенсивно трещиноватыми, выветрелыми породами, с прочностью на сжатие 500–700 кгс/см² и на растяжение 20–50 кгс/см². Сюда относятся зоны окисления (мощностью 10–40 м) и зоны тектонических нарушений. Модуль трещиноватости может достигать 20–30 тр/м и более.

3) Третья группа (слабой крепости) – представлена сильно трещиноватыми и измененными породами.

Структурное строение массива:

Массив месторождения Актогай характеризуется сложным тектоническим строением и выраженной зональностью по устойчивости, что имеет важное значение при проектировании и эксплуатации карьерных бортов. На основе геологических, геофизических и инженерно-геологических данных установлено, что весь горный массив подразделяется на отдельные структурные блоки, сформированные семью основными системами трещиноватости. Эти системы трещин различной направленности и генезиса контролируют как локальное разрушение массива, так и развитие деформаций на больших площадях. В пределах месторождения выделено 11 тектонических блоков: Северо-западный, Северный, Буровой, Центральный, Диагональный, Восточный, Геофизический, Южный, Юго-восточный, Дальний и Колдарский. Каждый из них отличается своими структурными особенностями, степенью тектонической нарушенности, физико-механическими свойствами пород и уровнем гидрогеологической активности.

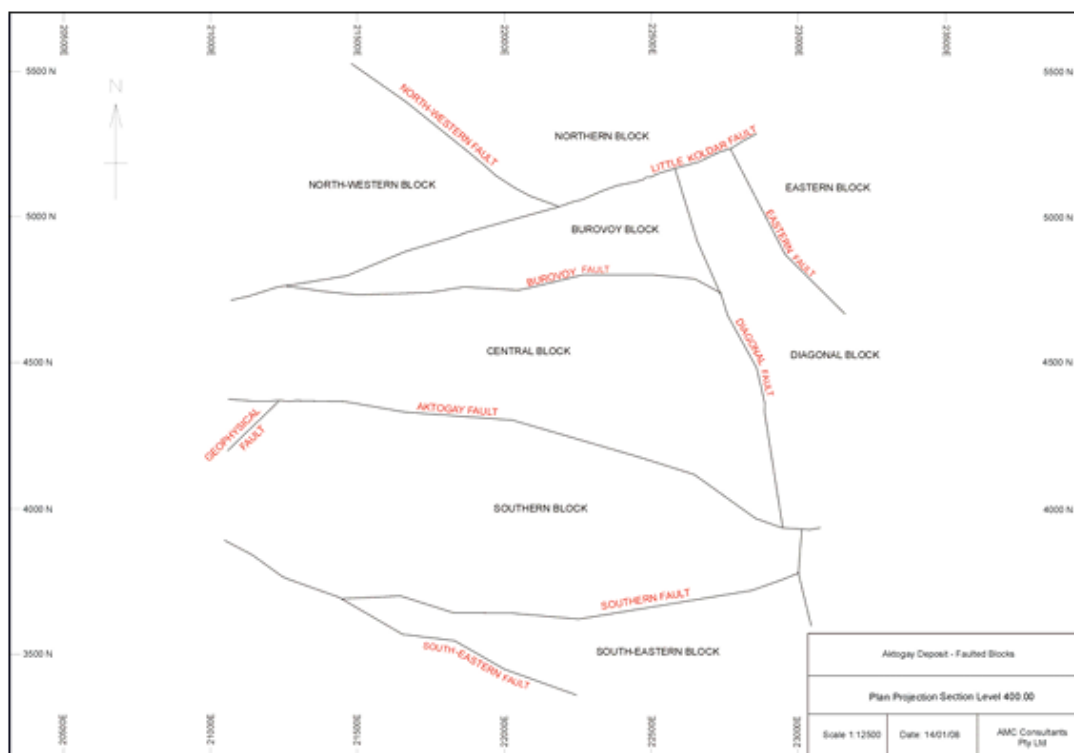


Рисунок 1.5 – Карта структурных доменов

По методике ВСЕГИНГЕО по устойчивости массива и бортов карьера выделено четыре группы участков

- 1) Весьма неустойчивые участки:
 - прочность пород: на сжатие – 500–600 кгс/см², на растяжение – 20–30 кгс/см².

- характеризуются интенсивной трещиноватостью (более 30 трещин на 1 м) с заполнением трещин гидроокислами железа и марганца, малахитом, азуритом.

- при проходке шурфов наблюдаются вывалы пород объёмом 0,5–1,5 м³.

2) Неустойчивые участки:

- прочность пород: на сжатие – 500–700 кгс/см², на растяжение – 30–50 кгс/см².

- расположены в зонах тектонических нарушений, представлены трещиноватыми и изменёнными граодиоритами, диоритами, вулканотэфро-осадочными породами.

3) Относительно устойчивые участки:

- прочность пород: на сжатие – 1100–1300 кгс/см², на растяжение – 50–80 кгс/см².

- умеренная трещиноватость (8–15 трещин на 1 п.м.), заполнитель – карбонаты и цеолиты.

4) Устойчивые участки:

- прочность пород: на сжатие – 1200–1500 кгс/см², на растяжение – 70–110 кгс/см².

- представлены неизменёнными и слабо изменёнными грацигоидами и вулканидами.

Данные о физико-механических свойствах пород на месторождении «Актогай» представлены на таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства основных типов пород и руды на образцах для месторождения «Актогай»

Тип пород, руда	Предел прочност и при сжатии, МПа	Предел прочност и при растяжении, МПа	Плотност $\gamma \cdot 10^3$, кгс/м³	Угол внутреннег о трения, град	Сцепление, кгс/см²
Осадочно-вулканогенные породы	146	10,2	2,67	37	306
Осадочные породы	123	11,9	2,59	37	306
Гранодиориты	132,5	8	2,65	36	280
Диориты	117,6	7,82	2,69	34	282
Дайки	95,3	12,4	2,67	40	220
Брекчии литинофилированные	96,7	8,1	2,71	40	220
Метасоматиты	144,3	9,1	2,64	35	282
Руды	118	8	2,7	34	280

2 Особенности горных работ на месторождении «Актогай»

2.1 Вскрытие и развитие горных работ на месторождении

Разработка карьера осуществляется поэтапно в 9 стадий, что обеспечивает устойчивость бортов и оптимизацию горнотранспортных работ на всех этапах эксплуатации показано на рисунке 2.1.

- высотная отметка дна карьера — +100;
- максимальная глубина — до 360 м;
- длина: 2796 м по поверхности;
- ширина: 1820 м по поверхности;
- сдвоенный уступ — 20 м, рабочий уступ — 10 м;
- угол откоса: в рыхлых породах: 35–50°, в скальных: 55–75°;
- предохранительные бермы: Ширина — 7,5–20 м;
- площадь карьера по поверхности — 4181 тыс. м²;
- бермы: двухполосные — 35 м, однополосные — 25 м;
- проект позволяет гибкую отработку запасов, не ограничивая содержание металлов по категориям.

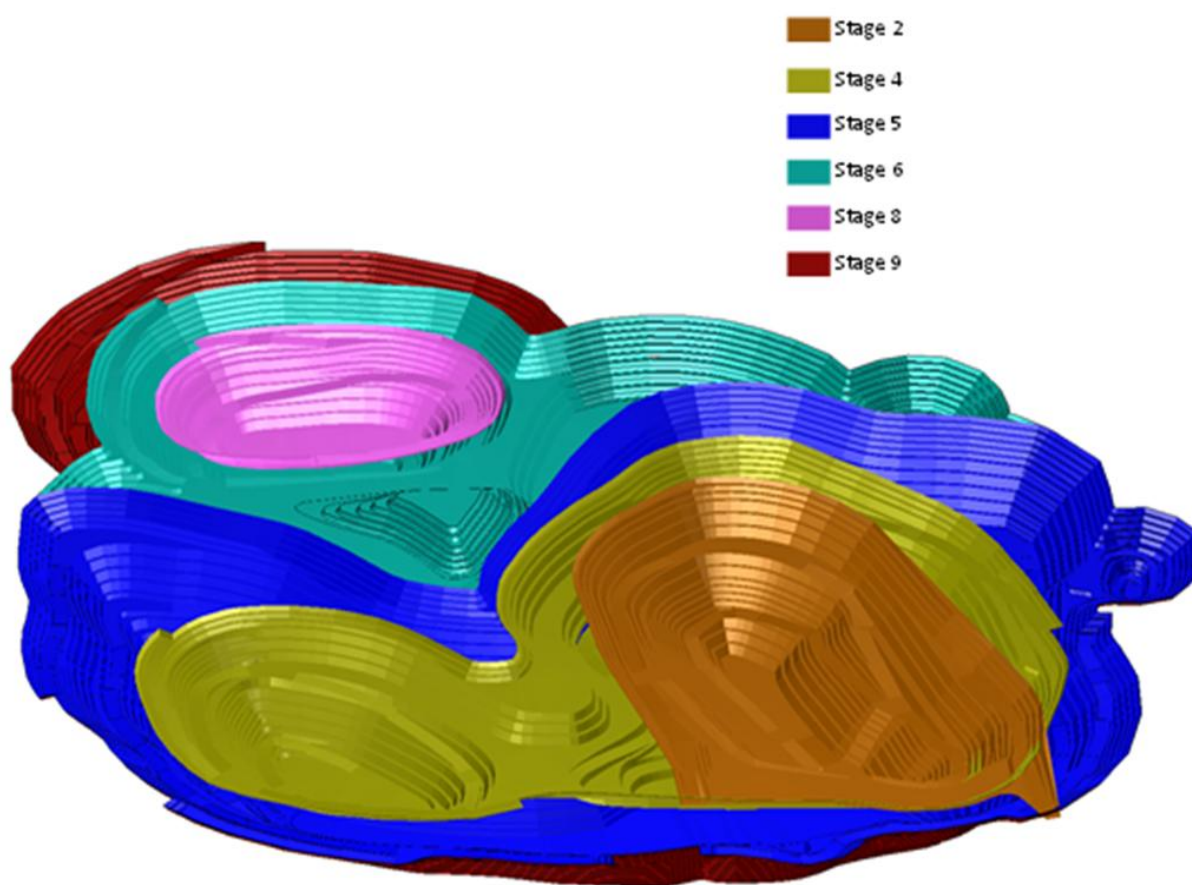


Рисунок 2.1 – Проектный дизайн карьера

Параметры уступов и бортов карьера разработаны с учётом рекомендаций АМС Consultants и исследований ВНИИЦветмет по обеспечению устойчивости при отработке месторождения Актогай.

Карьер отрабатывается поэтапно показано на рисунке 2.2. С учетом значительной протяженности месторождения в плане и ограниченных объемов переработки руды в первые годы эксплуатации, обусловленных постепенным наращиванием производительности обогатительных фабрик, вскрытие рудных тел осуществляется преимущественно временными спиральными и петлевыми автомобильными съездами. Эти съезды размещаются преимущественно в центральной части карьера, что обеспечивает оперативный доступ к основным фронтам работ. Также проектом предусмотрен вспомогательный автономный выезд, предназначенный для экстренной эвакуации персонала из карьера в случае аварийных ситуаций, что отвечает требованиям промышленной безопасности.

Согласно расчетам и планам, выданным в рамках горнотехнического моделирования в программном комплексе NPV Scheduler, начальные этапы вскрытия месторождения предусматривают строительство временных съездов в юго-восточной части участка. Вскрытие горизонтов начинается с проходки вскрывающей траншеи, по которой формируется разрезной котлован. В дальнейшем этот котлован расширяется в пределах заданного горизонта, обеспечивая тем самым доступ к рудным телам и возможность проведения горных работ с учетом геомеханических и логистических ограничений.



Рисунок 2.2 – Оработка второй стадий карьера, 2020год

Развитие горных работ осуществляется поэтапно. На первом этапе освоение месторождения сосредоточено в юго-восточной части, после чего формируется разрезной котлован в западной части месторождения. Это позволяет обеспечить устойчивую последовательность фронтов горных работ с учетом пространственного размещения запасов и технологических ограничений.

В связи с ограниченными объемами окисленных руд, на последующих стадиях разработки предусмотрено параллельное освоение южной и северо-западной частей месторождения, где сосредоточены запасы как окисленных, так и первичных сульфидных руд. Такая последовательность позволяет гибко управлять качеством рудного потока, обеспечивая стабильно высокое содержание меди на обогатительных фабриках.

С целью повышения экономической эффективности и ускоренного извлечения высококачественных руд, в начальный период эксплуатации карьера реализуется углубочная схема развития горных работ. При этом скорость вертикального углубления достигает 20–60 метров в год. С дальнейшим развитием карьера и расширением его бортов в западном и северо-западном направлениях темпы углубки снижаются до 13 метров в год. Это снижение обусловлено необходимостью соблюдения устойчивости бортов и увеличением объема вскрышных работ по мере роста площади карьера.

Принятая стратегия вскрытия и последовательного пространственно-временного развития горных работ обеспечивает не только эффективное и безопасное освоение запасов, но и позволяет гибко реагировать на изменения производственных условий, поддерживать стабильную подачу руды на переработку и осуществлять упреждающую отработку как окисленных, так и сульфидных руд.

2.2 Выбор системы разработки месторождения

Выбор рациональной системы разработки месторождения оказывает определяющее влияние на технико-экономические показатели горных работ, включая объем извлекаемой руды, себестоимость добычи, производительность оборудования, безопасность труда и экологические аспекты. На Актогайском месторождении, с учетом его масштабов, геологического строения, мощности рудных тел, горно-геологических условий и запланированных объемов добычи, было принято решение о применении классической транспортной системы с автомобильной вывозкой горной массы.

Основным аргументом в пользу такой схемы разработки является высокая оперативность и гибкость автомобильного транспорта, позволяющие эффективно реагировать на изменение фронтов горных работ, объемов добычи и условий эксплуатации. В отличие от конвейерных или железнодорожных схем, автомобильный транспорт не требует строительства перегрузочных станций и значительных капитальных вложений в инфраструктуру, таких как

подстанции, пути или перегрузочные бункеры. Это позволяет ускорить ввод в эксплуатацию новых участков карьера и снизить капитальные затраты на начальных этапах освоения месторождения.

В проекте предусмотрено использование карьерных автосамосвалов грузоподъемностью 136 тонн и 226,8 тонн, что соответствует современным требованиям по производительности, надежности и безопасности. Эти машины обладают высокой мобильностью, позволяют вывозить значительные объемы вскрышных пород и руды на большие расстояния и эффективно работают в условиях сложного рельефа и поэтапного углубления карьера. Их выбор также обоснован анализом маршрутов транспортировки, уклонов съездов, длины транспортных путей и годовой интенсивности грузопотоков.

Количество единиц карьерного автотранспорта по годам рассчитывается на основании годовой производственной программы, планов по вскрыше и добыче руды, а также графика ввода перерабатывающих мощностей. При этом учитывается коэффициент технической готовности техники, резервный фонд и сезонные колебания в объеме работ. Также предусматривается применение автогрейдеров, фронтальных погрузчиков, тягачей и сервисной техники, необходимой для обеспечения бесперебойной эксплуатации автосамосвалов.

Принятая система разработки на базе автомобильного транспорта позволяет обеспечить:

- высокую маневренность горнотранспортного комплекса;
- поэтапную отработку рудных тел с возможностью гибкой адаптации производственного плана;
- снижение капитальных затрат в сравнении с альтернативными системами (конвейерной или железнодорожной);
- эффективную эксплуатацию карьера на глубинах до 600–800 метров при сохранении производительности.

Таким образом, выбор системы разработки с использованием автомобильной схемы вывоза горной массы является оптимальным решением для условий Актогайского месторождения. Эта схема обеспечивает достижение целевых технико-экономических показателей, отвечает требованиям безопасности и устойчивого развития, а также позволяет эффективно использовать современный парк высокопроизводительной техники.

2.3 Ведение горных работ в карьере

Горные работы в карьере осуществляются в соответствии с требованиями «Правил обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы», а также утвержденными паспортами ведения горных работ.

Параметры и расположение рабочих площадок определяются планом горных работ с учётом размещения горного и транспортного оборудования,

линий электроснабжения, связи и транспортных путей. Конструктивные характеристики предохранительных берм, а также расстояние между уступами и их ширина устанавливаются проектной документацией и обеспечивают безопасную эксплуатацию и возможность механизированной очистки и улавливанию горной массы.

В процессе эксплуатации уточняются параметры уступов и берм на основе данных о физико-механических свойствах пород. При погашении уступов строго соблюдаются проектные значения углов откосов. Предохранительные бермы устраиваются с уклоном к борту карьера либо горизонтально, регулярно очищаются от породы и, при необходимости, ограждаются.

Постоянный контроль за состоянием откосов, уступов, траншей и отвалов осуществляется визуально и инструментально. При обнаружении признаков деформаций работы немедленно приостанавливаются до устранения угрозы устойчивости по утверждённому проекту. Периодичность наблюдений регламентируется технологическим регламентом предприятия.

Очистка уступов от нависей и кусков породы производится механизировано; ручные работы выполняются только по наряду-допуску под контролем ответственного специалиста. Работы на откосах с углом более 37° выполняются по отдельному проекту с обязательным использованием предохранительных поясов и страховочных канатов с подтверждённой датой испытаний.

Минимальное горизонтальное расстояние между рабочими зонами на смежных уступах должно составлять не менее полутора радиусов черпания при экскаваторной разработке. В зонах возможных обрушений применяются меры по повышению безопасности: предварительное разведочное бурение, отвод техники на время взрывных работ, маркшейдерские наблюдения за состоянием откосов.

Дорожные участки внутри карьера, за исключением забойных, ограждаются породными валами или защитными стенками. Высота вала должна быть не менее половины диаметра колеса самого крупного карьерного автомобиля, при этом он должен располагаться вне призмы возможного обрушения. Расстояние от его внутренней кромки до проезжей части должно составлять не менее половины диаметра этого же колеса.

2.4 Технология буровзрывных работ

Буровзрывные работы на карьере Актогай выполняются в соответствии с проектной документацией, требованиями промышленной безопасности и технического регламента предприятия. Основной целью буровзрывных работ является разрушение скальных и полускальных пород для последующей экскавации и транспортировки горной массы.

Основные технологические задачи включают:

- эффективное разрушение скальных и полускальных пород различной крепости;
- обеспечение заданной granulометрии горной массы для последующей экскавации;
- минимизацию негативного влияния на устойчивость бортов [1].

В качестве взрывчатых веществ (ВВ) применяются современные гранулированные и эмульсионные составы — АНФО, инкапсулированные эмульсии и водостойкие патронированные ВВ, обеспечивающие высокую степень разрушения с минимальной выбросом пыли и газов. Заряжание скважин осуществляется механизированным способом с соблюдением мер безопасности и герметизацией устьев. Инициирование производится с применением неэлектрических систем (Nonel) либо электронных детонаторов, обеспечивающих точное задерживание.

Параметры буровзрывных блоков (сетка бурения, глубина и диаметр скважин, коэффициент рыхления, объем горной массы на блок) подбираются в соответствии с типом породы и заданной производительностью экскавационного оборудования. Оптимизация взрывных работ направлена на достижение равномерного дробления, уменьшение переизмельчения руды и обеспечение устойчивости откосов карьера [2].

Контроль качества буровзрывных работ осуществляется путём визуального осмотра блоков после взрыва, фотограмметрии и анализа granulометрического состава. Особое внимание уделяется взрывам вблизи бортов карьера — применяются пониженные заряды, зумпфование скважин и сокращённые интервалы задержек для снижения сейсмического воздействия.

Технология буровзрывных работ постоянно оптимизируется с учётом данных геомеханического мониторинга, а также для минимизации негативного влияния на устойчивость уступов, снижение затрат и повышение безопасности производства.

На месторождении Актогай в производственных целях используются буровые установки ведущих мировых производителей: Sandvik, Epiroc (FlexiROC) и Pit Viper. Эти буровые станки зарекомендовали себя как надежное и эффективное оборудование, обеспечивающее высокую производительность при бурении скальных пород.

Для бурения скважин в производственных блоках применяется диаметр 203 мм, обеспечивающий необходимую степень дробления массива и оптимальную производительность при взрывных работах. Для работ по предварительному щелеобразованию (контурному бурению) используется меньший диаметр — 165 мм, что позволяет минимизировать разрушение за пределами проектного контура и снизить воздействие на устойчивость бортов.

Ниже приведены паспорта и характеристики буровых установок, используемых на месторождении. Графические материалы и данные о характеристике представлены в следующих рисунках и таблицах:



Рисунок 2.3 – Буровая установка Sandvic D55SPR

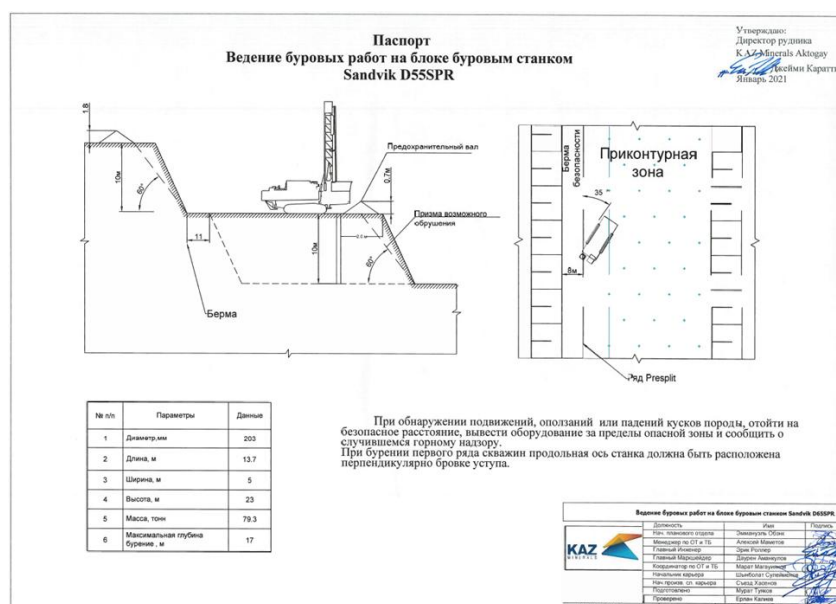


Рисунок 2.4 – Паспорт ведение работ буровой установкой

Буровая установка Sandvik D55SPR представляет собой мощное и высокоэффективное оборудование, предназначенное для бурения скважин большого диаметра при открытых горных работах. Основное её назначение — бурение взрывных скважин в прочных и крепких горных породах. Установка оснащена современным дизельным двигателем высокой мощности, обеспечивающим автономную работу в удалённых районах без необходимости в подключении к внешним источникам энергии.

Таблица 2.1 – Технические характеристики Sandvik D55SPR

Параметр	Значение
Тип буровой установки	Самоходная, дизельная, с вращательным бурением
Максимальный диаметр бурения	229 мм
Рекомендуемый диаметр бурения	203 мм
Максимальная глубина бурения	До 55 м (при однозаходном бурении)
Тип бурения	Вращательное (DR), возможна установка ПБУ
Система подачи	Канатно-блочная, цепная или гидравлическая
Сила подачи / подъема	До 311 кН / 311 кН
Максимальный крутящий момент	До 7700 Н·м
Скорость вращения шпинделя	До 150 об/мин
Двигатель	Caterpillar C15 ACERT, 403 кВт (540 л.с.)
Система пылеподавления	Сухая с фильтрацией



Рисунок 2.5 – Буровая установка Flexroc D65

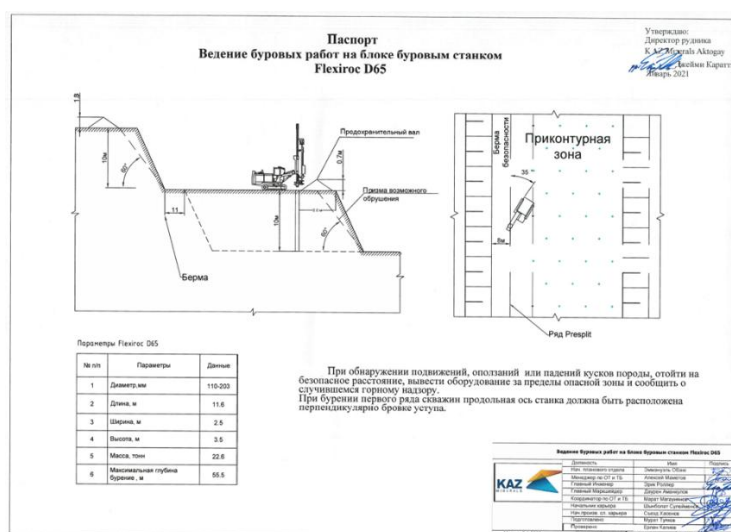


Рисунок 2.6 – Паспорт ведение работ буровой установкой

Таблица 2.2 – Технические характеристики Sandvik D55SPR

Параметр	Значение
Тип буровой установки	Самоходная, дизельная, с погружным пневмоударником
Рекомендуемый диаметр бурения	110–203 мм
Максимальная глубина бурения	До 54 м (при использовании удлинителей)
Тип бурения	Вращательно-ударное (DTH)
Система подачи	Катковая с гидравлическим приводом
Сила подачи / подъема	250 кН / 200 кН
Максимальный крутящий момент	3400 Н·м
Скорость вращения шпинделя	До 120 об/мин
Двигатель	Caterpillar C15, 403 кВт (540 л.с.)
Масса установки (в рабочем состоянии)	~36 тонн



Рисунок 2.7 – Буровая установка Pit Viper 231

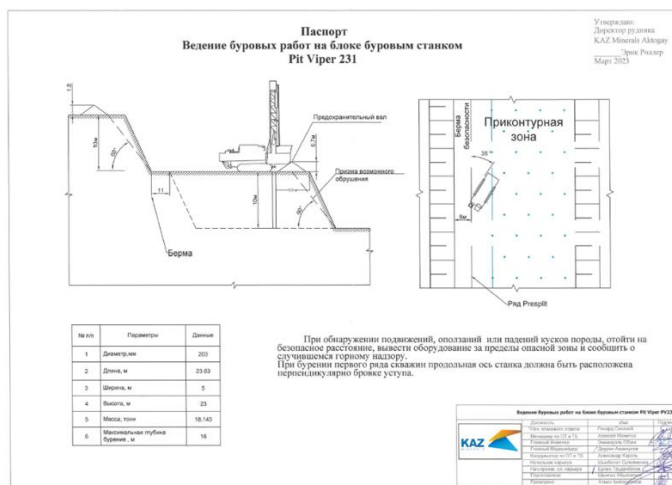


Рисунок 2.8 – Паспорт ведение работ буровой установкой

Таблица 2.3 – Технические характеристики Pit Viper 231

Параметр	Значение
Тип буровой установки	Самоходная, дизельная, с верхним приводом
Рекомендуемый диаметр бурения	171–270 мм
Максимальная глубина бурения	До 75 м
Тип бурения	Вращательное и вращательно-ударное (DTH)
Система подачи	Канатная или цепная
Сила подачи / подъема	До 311 кН / 311 кН
Крутящий момент ротора	До 13 000 Н·м
Скорость вращения ротора	До 140 об/мин
Двигатель	САТ С27 или аналог, 760 кВт (1020 л.с.)
Масса установки (в рабочем состоянии)	~90 тонн
Система пылеподавления	Сухая система с фильтром и вентилятором

На Актогайском месторождении добыча горной массы осуществляется буровзрывным способом, который является наиболее эффективным методом разрушения твёрдых скальных пород в условиях крупномасштабной открытой разработки. Основная цель буровзрывных работ — обеспечение заданной кусковатости породы в развале, что является критически важным фактором для производительности экскавационно-погрузочной техники, а также для эффективности последующих процессов дробления, транспортировки и переработки, сводные данные отображены на таблице 2.4.

Параметры буровзрывных работ:

Расчётные параметры буровзрывных работ были определены на основе отраслевых стандартов и типовых рекомендаций для разработки месторождений с твёрдыми горными породами, с учетом геомеханических характеристик массива. Базой для проектирования послужили данные международной инженерной компании AMC Consultants.

Удельный расход взрывчатых веществ (ВВ):

0,67 кг/м³ — для неветренных, прочных пород, таких как сульфидные руды и вскрышные материалы, залегающие ниже отметок 400–420 м.

0,54 кг/м³ — для относительно мягких и фрагментированных окисленных руд, требующих щадящего взрывания для сохранения условий, благоприятных для кучного выщелачивания.

Тип применяемых ВВ:

В качестве основного взрывчатого вещества используется эмульсионная композиция Fortis Extra 70, обладающая следующими преимуществами:

- стабильная плотность и высокая энергетическая эффективность;

- низкая чувствительность к механическим воздействиям, что повышает уровень безопасности при хранении и транспортировке;
- хорошая водостойкость, что особенно важно при наличии обводнённых зон.

Организация буровзрывных работ

Взрывные работы проводятся в соответствии с типовым проектом массового взрыва. Массовым взрывом считается одновременное инициирование двух и более скважинных зарядов, соединённых в единую взрывную сеть. Такой подход обеспечивает эффективное разрушение массива и оптимальное распределение энергии взрыва.

- перед каждым массовым взрывом разрабатывается индивидуальный проект взрыва, включающий:
 - схему буровзрывного блока, отражающую расположение скважин, тип заряда и направление инициирования;
 - таблицу корректировочного расчёта зарядов по каждой скважине, с учётом глубины, диаметра и литологических особенностей массива;
 - порядок и временные интервалы подрыва для последовательного инициирования зарядов с целью управления сейсмическим воздействием и направления выброса горной массы;

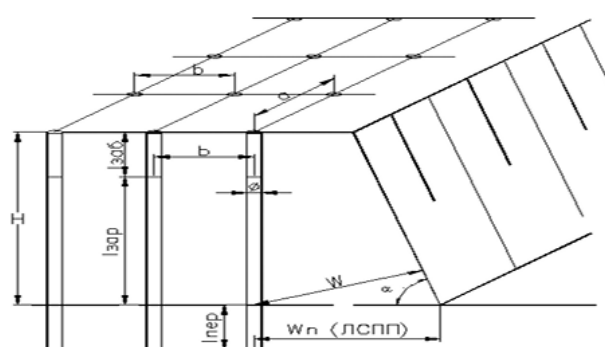
Таблица 2.4 – Сводные данные по буровзрывным работам

Параметр	Ед. изм.	Сульфидная руда	Окисленная руда
Высота уступа	м	10	10
Тип бурового станка	-	Sandvik D55SP (либо аналог)	Sandvik D55SP (либо аналог)
Тип взрывчатки	-	Эмульсия	Эмульсия
Текущая скорость бурения	м/час	20	25
Диаметр скважины	мм	200	200
Удельный расход взрывчатого вещества	кг/м³	0,67	0,54
Тип ВВ	-	Fortis Extra 70	Fortis Extra 70
Плотность ВВ	г/см³	1,20	1,20
Расстояние между рядами скважин	м	6-7	6-7
Интервал между скважинами	м	7-8	7-8
Глубина скважин	м	11	11
Глубина перебура	м	1	1
Ожидаемый выход горной массы с 1 погонного метра скважины с учетом 5%	м³/м	36,5	44,3

Для минимизации влияния взрывных работ на устойчивость бортов применяются методы предварительного щелеобразования и контурного взрывания. Схемы расположения показаны на рисунке 2.9, конструкция контурного блока показана на рисунке 2.10 и 2.11.



Рисунок 2.9 – Обзор на буровзрывные блоки



- b и a - расстояние между скважинами в ряду и рядами скважин
- H - высота уступа
- W - линия наименьшего сопротивления
- W_n - сопротивление по подошве
- $l_{заб}$ - длина забойки
- $l_{зар}$ - длина заряда
- $l_{пер}$ - длина перебура
- $\varnothing$ - диаметр скважины

Рисунок 2.10 – Схема расположения буровзрывных скважин

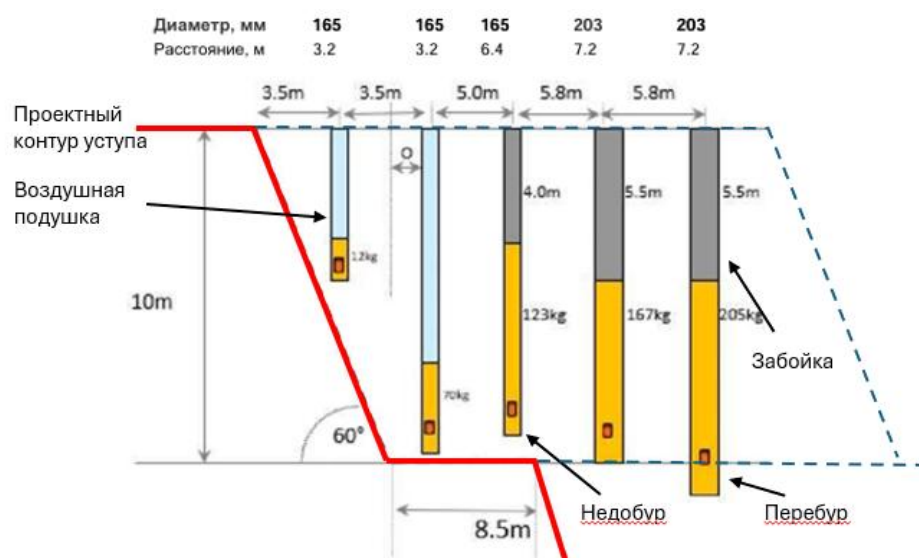


Рисунок 2.11 – Проект контурного блока

2.5 Ведение буровзрывных работ на проектном контуре карьера

По мере приближения горных работ к проектной границе карьера возникает необходимость в обеспечении устойчивости и точной геометрии откосов. Для достижения этих целей применяется контурное взрывание, основной задачей которого является формирование откосов с заданными параметрами (в первую очередь угла откоса) и минимизация сейсмического и разрушительного воздействия на оставляемый массив за пределами проектного контура [3].

На практике наибольшее распространение получило предварительное щелеобразование, особенно в крепких скальных породах, где требуется достижение откосов с углом $\alpha \geq 60^\circ$, процесс бурения показано на рисунке 2.12 и параметры буровзрывных работ показаны на таблице 2.5. Этот способ обеспечивает высокую точность формирования границ уступа и способствует сохранению целостности массива, ограничивая развитие трещиноватости и микродеформаций, способных снизить устойчивость борта в последующем.

Принцип метода:

Суть технологии предварительного щелеобразования заключается в бурении ряда параллельных наклонных скважин вдоль верхней бровки проектируемого уступа. Глубина скважин, как правило, соответствует высоте сдвоенного уступа (обычно 10–20 м), а угол наклона подбирается в соответствии с проектным значением угла откоса, обеспечивая точное повторение проектной геометрии. Применяются буровые установки, способные выполнять наклонное бурение с высокой точностью (например, Flexiroc D65).

Скважины заряжаются маломощными ВВ (обычно Power Split), с плотностью от 1.4 до 2.0 т/м³, и взрываются заранее — до массового взрыва основного блока. Важным элементом технологии является инициирование зарядов сверху вниз, что способствует равномерному раскрытию щели и исключает замыкание зарядов.

Влияние на параметры основного взрыва:

После образования отрезной щели формируется естественный разрыв в массиве, по которому распространяются разрушения от основного заряда. Это позволяет эффективно контролировать развитие трещин и снизить разрушение за пределами проектного откоса. Последний ряд технологических скважин, находящийся ближе всего к щелеобразующим, размещается на уменьшенном расстоянии от щели — примерно в 1.7–2 раза меньше, чем стандартный шаг между скважинами. При этом в этих скважинах уменьшается масса заряда на 30–35%, чтобы избежать избыточного воздействия на откосную часть массива.

Организация и планирование работ:

Работы по формированию отрезной щели необходимо выполнять заранее, на стадии подхода блока к проектной границе карьера. Для этого на месторождении Актогай, скважины предварительного щелеобразования бурят до контурных блоков. Рекомендуется выполнять щелеобразование за 40–50 м до контура, чтобы успеть завершить формирование щели до проведения массовых взрывов в приконтурной зоне [4].

Технические параметры:

Таблица 2.5 – Параметры БВР при щелеобразовании на проектном контуре карьера

Параметры	Единицы	Показатели
Высота уступа	м	10–20
Диаметр скважины	мм	140, 165
Тип ВВ		Power split
Плотность ВВ	т/м ³	1,4–2
Интервал между скважинами	м	2
Угол наклона скважин	градус	В зависимости от проекта (бурится по углу откоса)
Расход ВВ на 1000 пог.м уступа	т	0,5
Объём бурения с учётом 5% теряемых скважин	м/1000 п.м	100



Рисунок 2.12 – Бурение скважин предварительного щелеобразования

При выполнении буровзрывных работ методом предварительного щелеобразования крайне важно обеспечивать высокую точность бурения скважин, поскольку от этого напрямую зависит точность формирования откоса и, как следствие, устойчивость борта карьера в проектом положении.

Для достижения требуемой геометрии бурения необходимо постоянно контролировать направление и угол наклона скважин. Это осуществляется с использованием GPS-навигации, а также специализированных инклинометрических систем, устанавливаемых на буровые установки. Точная ориентация скважин гарантирует, что линия щелеобразования будет строго соответствовать проектному углу откоса, обеспечивая требуемую форму и минимизируя зону разрушения за пределами проектного контура.

Дополнительно, для повышения устойчивости устья скважин и предотвращения их обрушения, особенно в условиях трещиноватых или выветрелых пород, применяется обсадка устьевой части скважин с использованием ПВХ труб. Такие меры позволяют сохранить геометрию скважин до момента зарядки, обеспечить безопасность при загрузке взрывчатки и повысить общую надежность проведения щелеобразующих взрывов.

Таким образом, тщательное соблюдение технологии бурения, применение современных навигационных систем и поддержание целостности скважин с помощью обсадных труб — являются ключевыми факторами, влияющими на эффективность и безопасность контурного взрывания при формировании проектных откосов карьера.



Рисунок 2.13 – Взрывные работы на скважинах предварительного щелеобразования

Предварительное щелеобразование является важным этапом буровзрывных работ при подходе к проектному контуру карьера. Его основная задача — формирование ровной, устойчивой откосной поверхности с минимальным повреждением массива за контуром, момент взрыва скважин показано на рисунке 2.13.

Правильно реализованная схема щелеобразования обеспечивает следующие результаты:

- четкий, линейный контур откоса, соответствующий проектному углу (обычно $\geq 60^\circ$) показано на рисунке 2.15;
- минимальные зоны разрушения за пределами проектной линии, что критично при разработке уступов вблизи оборудования или инфраструктуры;
- повышенная устойчивость борта, за счёт уменьшения зон с ослабленными или трещиноватыми породами, показано на рисунке 2.14;
- снижение потребности в дополнительной зачистке или обрушении откоса после массового взрыва;

Однако при нарушении технологии возникают характерные дефекты:

- скважины пробурены с отклонением от проектного направления (без соблюдения угла наклона);
- неправильное размещение зарядов, особенно при отсутствии обсадных труб и смещения зарядной колонны;
- это приводит к неравномерной линии откоса, обвальным зонам и разрушению за проектным контуром, что негативно сказывается на безопасности и стабильности борта, показано на рисунке 2.16.



Рисунок 2.14 – Правильное образование щели между скважинами



Рисунок 2.15 – Обзор на откос после отработки



Рисунок 2.16 – Нарушение геометрии откоса при несоблюдении параметров щелеобразования

Контурное взрывание блоков — это метод буровзрывных работ, применяемый при массовых взрывах для обеспечения заданной геометрии уступов и предотвращения разрушений за пределами проектного контура. В отличие от метода предварительного щелеобразования, контурное взрывание в блоках проводится в составе основного взрыва, но с применением специальных инженерных решений в зарядке и расположении скважин [5].

Одним из ключевых элементов технологии является буферный (амортизирующий) ряд скважин, располагаемый перед контурным рядом. Буферные ряды принимают на себя часть энергии взрыва, снижая нагрузку на контурный массив. Скважины в буферном ряду бурятся с уменьшенным шагом и заряжаются менее мощно по сравнению с основным телом блока, что снижает воздействие ударной волны на край массива.

Контурные скважины в пределах блока бурятся с шагом 1,0–1,5 м и заряжаются малогабаритными зарядами малой плотности, как правило, с применением рыхлоуложенного ВВ или картузных зарядов. Зачастую используют защитные материалы, такие как глинистый тампонаж или песок, чтобы ограничить действие взрыва. Инициирование зарядов контурного и буферного ряда производится с замедлением относительно основного тела блока — для управления направлением разрушения и уменьшения переуплотнения породы [6].

Важным аспектом является синхронизация взрывной сети, обеспечивающая правильную последовательность подрыва рядов: сначала взрываются центральные ряды блока, затем буферные, и в последнюю очередь — контурные. Такой порядок позволяет создать направленное разрушение породы, снижая разлёт кусков и обеспечивая качественное формирование откоса.

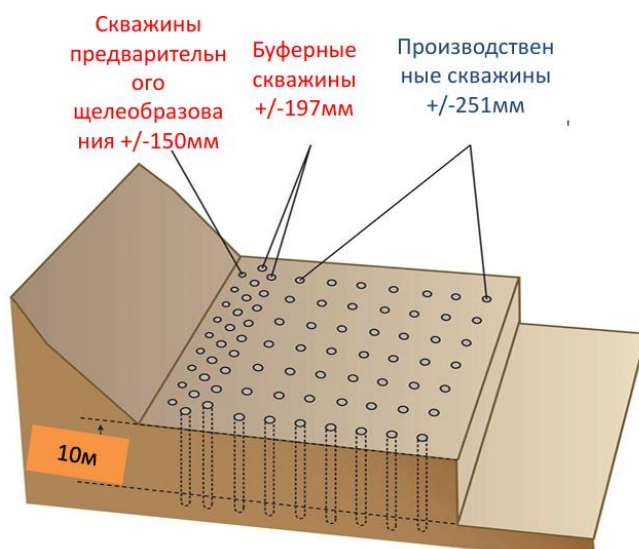


Рисунок 2.17 – Проектирование БВР при контурном взрывании

2.6 Геотехнические рекомендации по ведению буровзрывных работ на проектном контуре

При приближении горных работ к проектному контуру карьера особое внимание уделяется обеспечению устойчивости откосов, сохранению геометрии проектных границ и минимизации разрушений за пределами обрабатываемого блока. На этом этапе особенно возрастает риск переразрушения массива, формирования неустойчивых структур, смещений и сдвигов породы, что может привести к локальным обрушениям и значительному снижению устойчивости откосов. Эти риски значительно усиливаются в условиях развитой трещиноватости, нарушенности массива, наличия тектонически ослабленных зон, а также при наличии пород с пониженными прочностными характеристиками [7].

Для обеспечения эффективного и безопасного ведения буровзрывных работ (БВР) вблизи проектного контура карьера необходим системный и комплексный подход. Он должен учитывать не только геометрию бурения — шаг и диаметр скважин, угол их наклона, глубину, схему расположения — но и параметры заряжания: массу и распределение зарядов по длине скважины, плотность и тип взрывчатого вещества (ВВ), а также способ и схему инициирования. Ключевым элементом при этом является учет физико-механических свойств горных пород, так как именно они определяют поведение массива при взрывном воздействии — скорость распространения упругих и сдвиговых волн, амплитуду вибрации, уровень напряжений и степень разрушения.

С учетом совокупности этих параметров производится расчет и уточнение индекса взрываемости, на основании которого осуществляется геотехническое районирование территории в рамках концепции *blastability domaining*. Это районирование позволяет выделить участки с различной взрываемостью и необходимостью адаптации параметров БВР. В зависимости от условий массива и задач конкретного этапа горных работ корректируются ключевые параметры: шаг сетки бурения, диаметр и глубина скважин, удельный расход ВВ, схема распределения зарядов, временные задержки между рядами и скважинами, а также способ инициирования (например, электродетонаторы, неэлектрические системы, электронные детонаторы и т.д.).

Особое внимание уделяется применению контурного и буферного взрывания, направленных на снижение разрушений за пределами проектных границ. Эти методы позволяют эффективно отделять породу от массива, минимизируя при этом развитие зон микротрещиноватости в откосной части карьера.

Таким образом, внедрение адаптивного подхода к проектированию и проведению БВР с учетом геомеханических особенностей массива позволяет минимизировать деструктивное воздействие на контурные поверхности, обеспечивать формирование устойчивых откосов, соответствующих проектным углам, и предотвращать образование зон переразрушения за пределами отрабатываемого блока. Это в свою очередь способствует общему повышению безопасности работ, продлению срока службы откосов и снижению затрат на их последующую стабилизацию.

1) Районирование по взрываемости (Blastability Domaining)

Районирование по степени взрываемости представляет собой современный геотехнический подход, направленный на адаптацию параметров буровзрывных работ (БВР) в соответствии с реальными условиями залегания и геомеханическими свойствами горных пород. Основная цель blastability domaining — повышение эффективности взрывных работ, снижение избыточного расхода взрывчатых веществ, улучшение контролируемости разрушения массива, а также достижение требуемой кусковатости для оптимальной работы погрузочно-транспортного оборудования.

Процедура районирования основывается на анализе и интерпретации комплекса геомеханических и геологических данных, включая:

- литологический состав (например, оксидные, сульфидные, интрузивные породы и их сочетания);
- степень выветрелости и степень структурной нарушенности массива;
- параметры трещиноватости (частота, раскрытие, протяженность) и ориентировка разломов;
- качество керна (например, по индексу RQD — Rock Quality Designation);
- механические характеристики пород, в частности предел прочности на одноосное сжатие (UCS) и модуль упругости.

На основе этих данных выделяются геотехнические зоны с различной степенью взрываемости, каждая из которых получает уникальный идентификатор — например, зона высокой, средней или низкой взрываемости. Эти зоны в дальнейшем интегрируются в геологическую и инженерную 3D-геомодель карьера и используются при проектировании БВР: выборе шага бурения, подборе типа и массы зарядов, системы инициирования и временных задержек.

Применение blastability domaining обеспечивает:

- минимизацию перезарядки скважин за счёт точного расчета удельного расхода ВВ;

- снижение переуплотнения массива, особенно в зонах откосов, за счёт оптимального распределения энергии взрыва;
- повышение точности формирования геометрии уступов и проектных контуров карьера;
- повышение безопасности откосов при проведении массовых взрывов, особенно вблизи нестабильных блоков;
- рациональное управление направлением и распределением энергии взрыва, что критично для минимизации переразрушения массива и снижения вибрационного воздействия.

Таким образом, blastability domaining представляет собой важнейший элемент интегрированной системы проектирования БВР, показано на рисунке 2.18 и 2.19. Позволяющий учитывать вариабельность массива, повысить технологичность отработки и обеспечить геотехническую устойчивость карьера на всех этапах его развития.

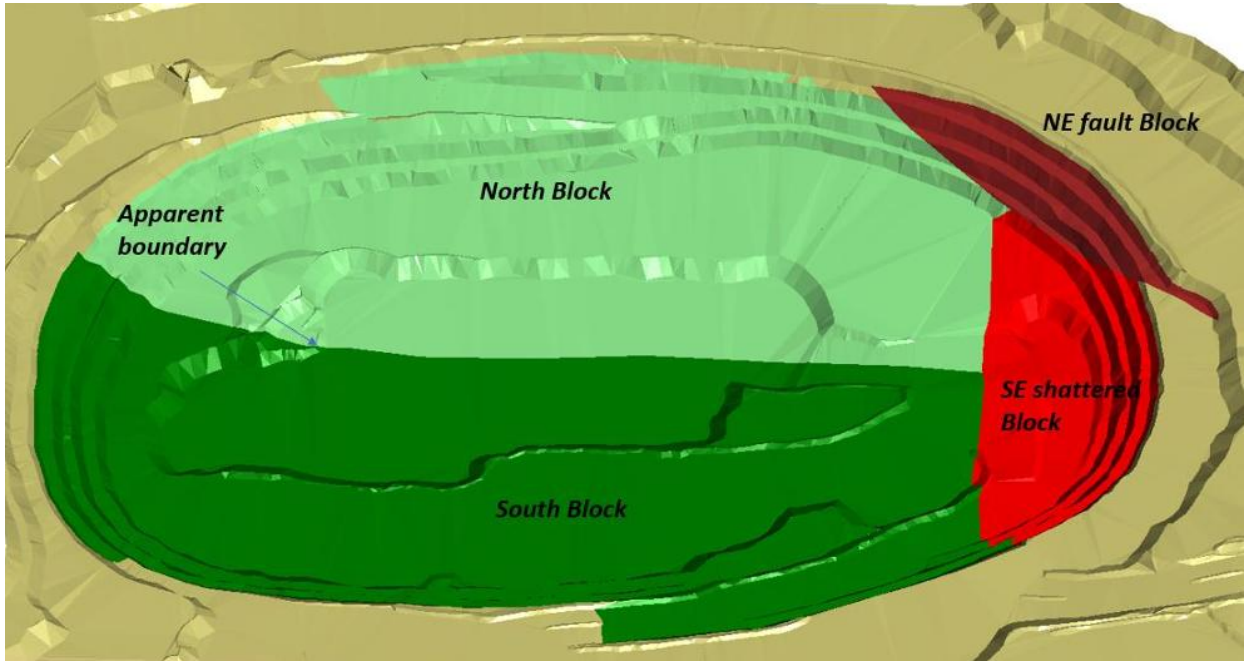


Рисунок 2.18 – Карта районирования взрываемости северо-западной части Актогайского карьера.

ИНДЕКС ВЗРЫВАЕМОСТИ- СТАДИЯ 8 - ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ДОМЕНЫ														ВЕРСИЯ 01/2023-05-12				
ДОМЕН	ПОРОДА	ВЫВЕТРИВАНИЕ	БОРТ	ОПИСАНИЕ RMD	ОПИСАНИЕ JPS	ОПИСАНИЕ* JPO	UCS (MPa)	ОПИСАНИЕ UCS	SG1 (t/m3)	RMD RATING	JPS RATING	JPO RATING	SGI RATING	H RATING	BI	Уд расход BB (CE)	Уд расход BB kg/t	Энерг. фактор(FE)
Сев.блок	Диорит	SULPHIDE	N (Север)	блочный	с умеренным интервалом	падение в забой	96	крепкий	2.64	20	20	20	16.0	2.51	39	0.16	0.41	0.59
Юж.блок	Диорит	SULPHIDE	S (ЮГ)	блочный	с умеренным интервалом	падение в борт	82	крепкий	2.64	20	20	40	16.0	2.22	49	0.20	0.52	0.74
NE_Weak_block	Диорит	SULPHIDE	NE (Сев-восток)	блочный	с умеренным интервалом	падение в забой	42	средней крепости	2.64	20	20	20	16.0	1.38	39	0.15	0.41	0.58
SE_Shattered	Диорит	SULPHIDE	SE (Юго-восток)	блочный	с узким интервалом	падение в забой	30	средней крепости	2.64	20	10	20	16.0	1.13	34	0.13	0.35	0.50

Рисунок 2.19 – Параметры взрываемости доменов

На примере представлена восьмая стадия развития Актогайского карьера, расположенная в северо-западной части выемочного пространства. Данная территория разделена на четыре геотехнических домена, каждый из которых отличается характером залегания основных систем трещин, расстоянием между ними, а также физико-механическими свойствами и прочностными характеристиками горных пород.

Для каждого домена был рассчитан индекс взрываемости по Лилли (Lilly Blastability Index, LBI), что позволило адаптировать параметры буровзрывных работ к конкретным геомеханическим условиям. Такой подход обеспечивает более точный контроль разрушения массива, минимизирует избыточное воздействие на устойчивость откосов, способствует эффективному формированию проектных контуров уступов и улучшает качество вскрытия горной массы.

1) Цель и задачи геотехнических рекомендаций при контурном взрывании:

Предоставление актуальной геотехнической информации для проектирования контурного взрыва с целью минимизации негативного влияния взрывных работ на устойчивость откосов и снижение риска переразрушения массива за пределами проектного контура.

Основные задачи:

- сбор, систематизация и анализ геотехнических данных участка контурного взрывания;
- Выделение геотехнических доменов и определение их характеристик;
- расчёт индекса взрываемости (Blastability Index) для каждого домена; Определение наиболее благоприятных направлений
- распространения взрывной энергии с учётом трещинной проницаемости и ориентировки разломов;
- идентификация потенциальных проблем при бурении и взрывании (например, возможное смещение блоков, выбросы, образование выбоин и переуплотнение массива);

2) Расчёт категории взрываемости: индекс Лилли (LBI)

Категоризация участков по степени взрываемости выполняется на основе широко применяемого рейтинга Lilly Blastability Index, который интегрирует ключевые геомеханические параметры массива:

$$LBI=0,5\times(RMD+JPS+JPO+SGI+H), \quad (2.1)$$

где: RMD (Rock Mass Description) — описание структуры массива, отражающее степень нарушенности и блочности показано на таблице 2.7;

JPS (Joint Plane Spacing) — расстояние между основными трещинами, характеризующее размер блоков показано на таблице 2.6;

JPO (Joint Plane Orientation) — пространственная ориентировка главной системы трещин относительно фронта работ (забоя) показано на таблице 2.5;

SGI (Specific Gravity Index) — плотность породы, определяющая массу взрываемого материала;

H (Hardness) — крепость породы, выраженная в относительных единицах шкалы Лилли.

Каждому из параметров присваивается значение по шкале Лилли (обычно от 1 до 10), в зависимости от их влияния на разрушение. Полученный интегральный индекс LBI позволяет классифицировать массив по взрываемости: от легкоразрушаемого до трудноразрушаемого. На основе этих данных подбираются параметры бурения, тип ВВ, распределение зарядов и методы инициирования.

Преимущества применения LBI и геотехнического районирования:

- повышение эффективности контурного и буферного взрывания;
- минимизация переразрушения откосной части массива;
- снижение расхода ВВ и затрат на стабилизационные мероприятия;
- улучшение контроля за формой и геометрией уступов;

Таблица 2.5 – Показатели JPO (Ориентировка систем трещин)

Значение JPO	Описание	Пример
10	Горизонтально	
20	Падение в выработанное пространство	
30	Простирание перпендикулярно к борту	
40	Падение в борт	

Таблица 2.6 – Показатели JPS (Шаг между трещинами)

Значение JPS	Описание
10	Близкий (<0.1 м)
20	Средний (0.1–1 м)
50	Большой (>1 м)

Таблица 2.7 – Показатели RMD (Описание горного массива)

Значение RMD	Описание
10	Раздробленный
20	Блочный
50	Массивный

SGI – показатель плотности взрывающей породы (Specific Gravity Influence)

Определяется по формуле:

$$SGI = 23 \cdot SG - 50, \quad (2.2)$$

где: SG – плотность пород в т/м³

Плотность выбираем в зависимости от литотипа.

H – показатель крепости породы (Hardness) Определяется по формуле:

$$H = (UCS + 23.7)/47.6 \quad (2.3)$$

(UCS – прочность пород на одноосное сжатие)

Согласно индексу Lilly основное влияние на качество взрывных работ оказывает трещиноватость и блочность массива. В связи с этим основное влияние на индекс взрываемости оказывают параметры, связанные со структурой массива – RMD, JPS, JPO

Таблица 2.8 - Параметры взрывания на контурном блоке

Параметры взрывания	
Описание массива	10
Шаг между трещинами	10
Ориентировка трещин	20
Плотность пород	15
Крепость пород	0.8
Индекс Взрываемости	27.9
PF (кг/т)	0.11
PF (кг/м ³)	0.29

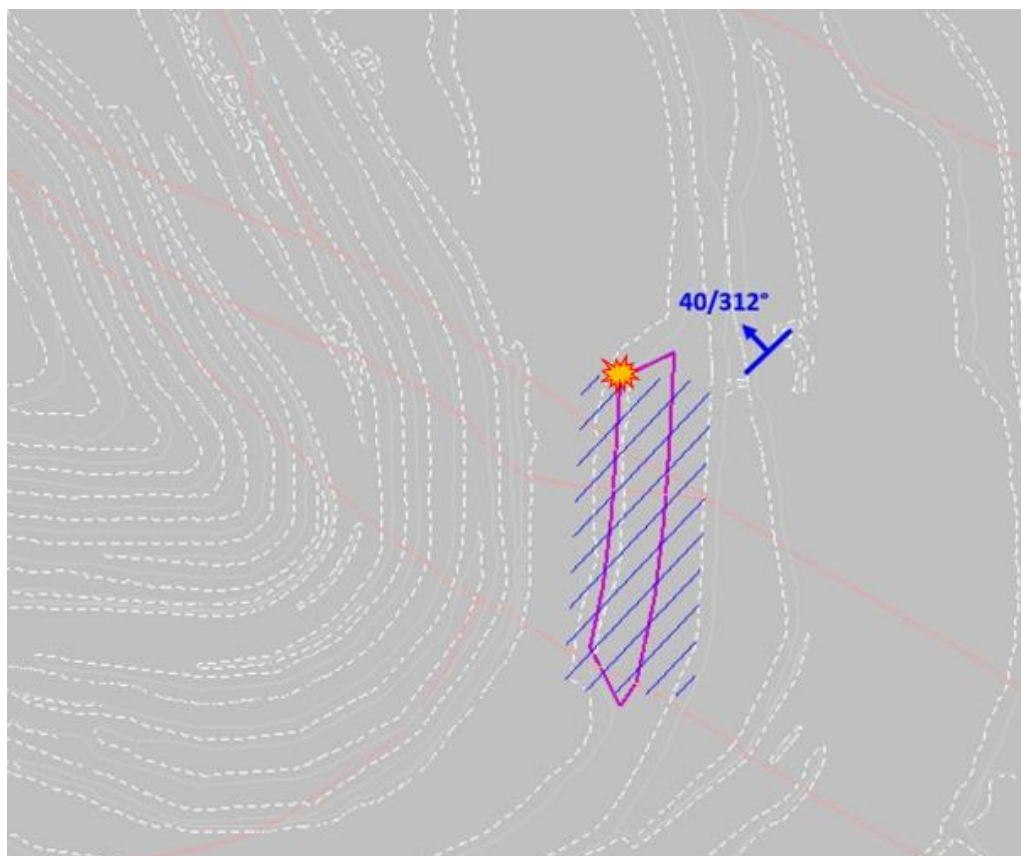


Рисунок 2.20 – Рекомендация на инициирование и направление взрыва на контурном блоке

3) Оптимизация взрывных работ при контурном взрывании за счет мониторинга и анализа

Эффективность и безопасность контурного взрывания во многом зависят не только от этапа проектирования, но и от послевзрывного мониторинга и анализа фактических результатов. Контроль за результатами буровзрывных работ (БВР), проведённых на контурных блоках, особенно на участках с предварительным щелеобразованием, позволяет оперативно вносить корректировки в параметры последующих взрывов и минимизировать негативное воздействие на устойчивость массива.

После проведения взрыва осуществляются следующие мероприятия:

- визуальный и инструментальный осмотр фронта отбойки и откосной части массива с целью выявления признаков переразрушения, блоковых смещений, осыпей и трещинообразования за пределами проектного профиля, показано на рисунке 2.21;
- контроль качества откоса, включая сравнение фактических углов откосов с проектными значениями;

- измерения остаточных вибраций и оценка амплитуд сейсмического воздействия вблизи контуров — данные используются для верификации расчетных моделей;
- оценка эффективности щелеобразования — проводится анализ формы и глубины полученных щелей, их раскрытия и протяжённости вдоль проектной линии разделения, показано на рисунке 2.22;
- документирование отклонений от проектных параметров бурения и зарядки, включая смещения скважин, нарушения конфигурации зарядов, преждевременные взрывы или перебои в инициировании.

Полученные результаты используются для:

- адаптации параметров бурения и зарядки при последующем контурном взрывании (например, корректировка угла наклона, уменьшение плотности заряда вблизи откоса, выбор меньших задержек);
- уточнения конфигурации щелевых зарядов, особенно при наличии зон с повышенной трещиноватостью или слабой связностью массива;
- повышения точности формирования проектной геометрии уступов, что критически важно при приближении к границам обрабатываемого блока или при вскрытии горизонтов с потенциальной нестабильностью.

Таким образом, внедрение регулярного мониторинга результатов контурного взрывания и последующего инженерного анализа позволяет выстроить замкнутый цикл управления качеством БВР, обеспечивая постоянную оптимизацию процессов, снижение рисков и повышение геотехнической устойчивости карьера.



Рисунок 2.21 – Визуальная инспекция проектной бермы после взрыва контурного блока

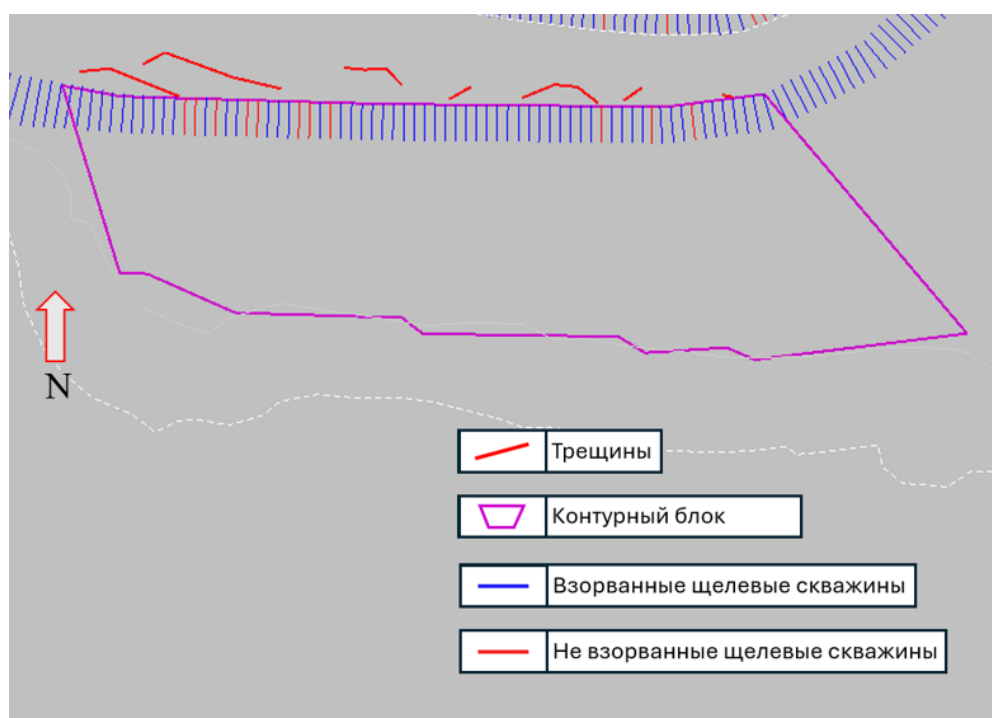


Рисунок 2.22 – Обзор на подбой проектной бермы

Анализ качества выполнения буровзрывных работ (БВР) в зоне проектного откоса, в том числе на участке контурного блока, требует комплексного подхода с учётом геомеханических, технологических и взрывотехнических факторов. Особое внимание уделяется оценке подбоев — смещений, разрушений или трещиноватости, возникающих за пределами проектной линии бермы. Такие изменения напрямую влияют на устойчивость бортов, требуют дополнительных зачисток и могут привести к увеличению объёмов внеплановой вскрыши.

Ключевые параметры, анализируемые при оценке подбоев:

- количество трещин, вышедших за проектную линию бермы;
- количество успешных скважин щелеобразования;
- максимальное распространение трещин на берме;
- наличие оголений при взрыве контурного блока;
- качество зарядки и обрушения скважин;
- скорость замедления и схема инициирования;
- показатели сейсмического воздействия (PPV).

Таким образом, регулярный мониторинг указанных параметров после проведения контурного взрыва позволяет не только оценить соответствие фактической откосной поверхности проектной, но и выявить причины отклонений, принять корректирующие меры для последующих взрывов и снизить геотехнические риски при дальнейшем приближении к проектной границе карьера [11].

4) Постановка борта в конечное положение:

Завершающим этапом буровзрывных работ в приконтурной зоне является приёмка откоса после формирования уступа и его постановка в конечное проектное положение. Geotechnical Final Wall Assessment (GFWA) Качество буровзрывных работ значительно влияет на состояние фактических уступов карьеров. Процедура Final Wall Assessment позволяет оценить качество БВР и своевременно сделать необходимые корректировки, оценка ведется по матрице, изображённой на рисунке 2.23.

При идеальном качестве БВР после полной отработки контурного блока верхняя и нижняя бровка должны быть поставлены в проектное положение, а на откосе уступа не должно быть видимых повреждений от взрывных работ [11].

Цель: оценить качество постановки в борта в конечное положение

Задачи:

- 1) Оценить геотехническое состояние уступа, в том числе:
 - качество формирования отрезной щели;
 - наличие повреждений от взрыва;
 - качество проработки верхней и нижней бровок.
- 2) Оценить соответствие фактической и проектной геометрий;
- 3) Оценить итоговое качество постановки в конечное положение;
- 4) Выполнить анализ основных причин отклонений;
- 5) Подготовить карту качества постановки бортов;
- 6) Выполнить анализ основных возможных причин отклонений.

Оценка качества постановки борта в конечное положение выполняется по матрице, включающей две категории параметров:

- 1) Геотехническое состояние уступа (F_c – face condition);
- 2) Соответствие геометрии уступа проекту (F_d – design factor).

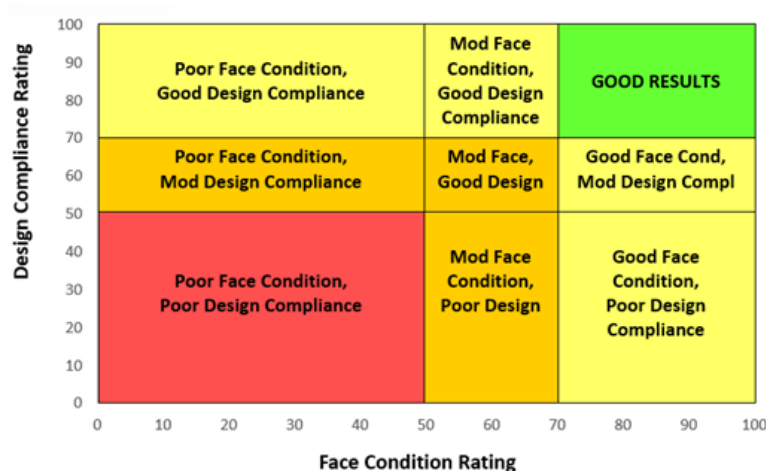


Рисунок 2.23 – Матрица оценки постановки борта



Рисунок 2.24 – Результат постановки борта в конечное положение

Оценка геотехнического состояния уступа выполняется для каждого блока.

При оценке учитываются:

- рыхлые обломки на откосе и верхней бровке (20 %);
- наличие навесей и подработки нижней бровки (25 %);
- видимые следы щелевых скважин (20 %);
- трещины после взрыва на верхней берме (10 %);
- раскрытие трещин (15 %)
- наличие горной массы на берме (5 %);
- отклонение нижней бровки (5 %).

По каждому показателю выставляются баллы, которые затем суммируются и получается рейтинг геотехнического состояния уступа от 0 до 100.

Для анализа качества отработки уступов и оценки соответствия фактической геометрии проектным параметрам на карьере Актогай применяется процедура Reconciliation в программном обеспечении Surpac. Этот подход позволяет систематизировать и количественно оценить отклонения, возникающие в процессе ведения горных работ, особенно в результате буровзрывных операций.

Оценка проводится по следующим ключевым параметрам:

- потеря верхней бровки (Crest Loss) Характеризует горизонтальное смещение верхней бровки уступа по сравнению с проектным положением.

Увеличенная потеря бровки может указывать на чрезмерное разрушение массива при взрывных работах или на неэффективность контроля за бурением и подрывом, рейтинг показан на таблице 2.9.

- положение нижней бровки (Toe Position) Оценивает точность достижения проектной отметки в основании уступа. Смещение нижней бровки влияет на объём выемки и может указывать на недоразрушение или переотбойку массива, рейтинг показан на таблице 2.10.

- отклонение угла откоса уступа (dBFA — Design Bench Face Angle) Представляет собой разницу между фактическим и проектным углом откоса уступа. Уменьшение угла может свидетельствовать о чрезмерной деструкции массива и необходимости корректировки параметров буровзрывных работ, тогда как увеличение — об избыточной сохранности массива, что может привести к завалам, рейтинг показан на таблице 2.11.

Рейтинг и интерпретация результатов

После проведения расчетов в модуле Reconciliation каждому из параметров присваивается рейтинговая оценка, основанная на степени отклонения от проектных значений. Эта оценка может быть выражена в баллах или цветовой шкале, позволяющей быстро визуализировать зоны с удовлетворительным и неудовлетворительным качеством отработки уступов, показано на рисунке 2.25.

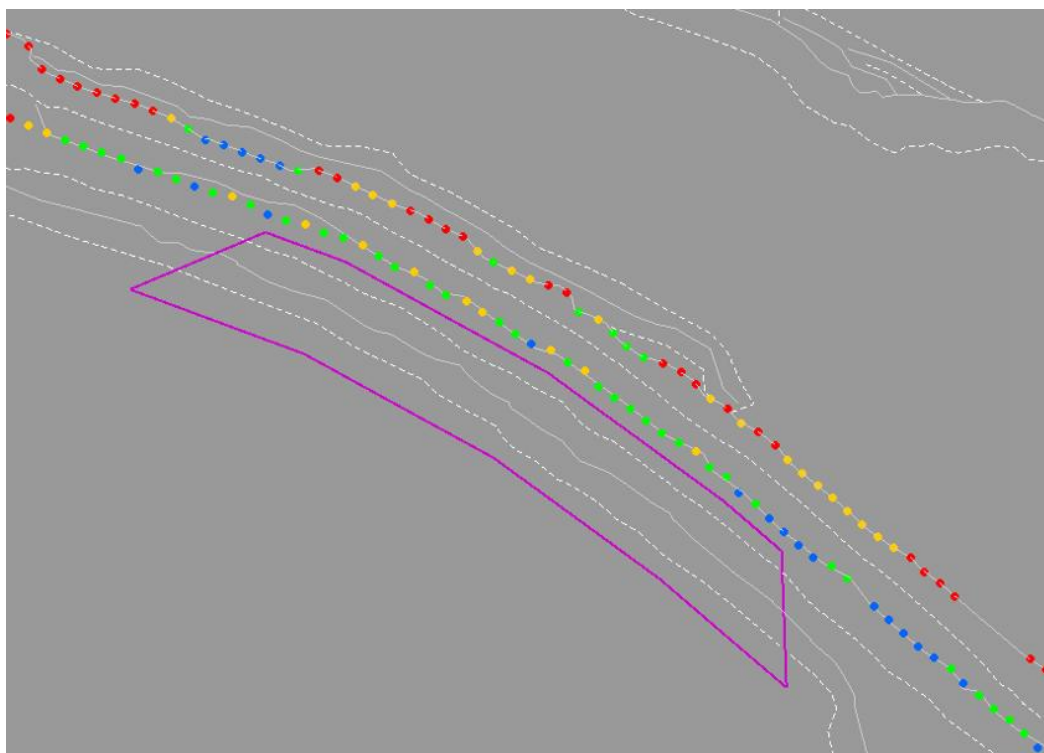


Рисунок 2.25 – Результат расчета фактического положения уступов от проектного положения

Таблица – 2.9 Потеря верхней бровки

Потеря верхней бровки	Рейтинг
Потеря верхней бровки менее 1 м	50
Потеря верхней бровки 1–2 м	35
Отклонение от проекта 2–3 м	15
Отклонение от проекта более 3 м	0

Таблица – 2.10 Положение нижней бровки

Отклонение нижней бровки от проекта	Рейтинг
Отклонение менее 1 м	30
Отклонение 1–2 м	20
Отклонение 2–3 м	10
Отклонение более 3 м	0

Таблица – 2.11 Отклонение угла откоса от проекта

Отклонение угла откоса	Рейтинг
Отклонение менее 4°	20
Отклонение от 4° до 8°	15
Отклонение от 8° до 12°	5
Отклонение более 12°	0

После выполнения геодезических и визуальных измерений, а также инженерного анализа качества выполненных буровзрывных работ, осуществляется количественная оценка соответствия геометрических и геотехнических параметров фактически сформированного уступа проектным требованиям. Требуется рассмотреть отклонения по геотехническим показателям и по требуемой геометрическим показателям. Данная оценка проводится с использованием двух интегральных показателей:

1) Показатель соответствия геометрии проектному дизайну (Fd — Design Factor)

Показатель Fd отражает степень точности реализации проектных геометрических параметров уступа, включая:

- BFA rating — Потеря или смещение верхней бровки (Brow Failure Assessment);
- CP rating — Отклонение положения нижней бровки (Crease Point Assessment);
- TP rating — Отклонение угла откоса уступа (Toe Point Angle Assessment).

Расчёт осуществляется по формуле:

$$F_d = \text{BFA rating} + \text{CP rating} + \text{TP rating}, \quad (2.4)$$

где: максимальное значение $F_d = 100$ баллов ($50 + 30 + 20$). Чем выше значение F_d , тем ближе фактические параметры к проектным, и тем выше геометрическая точность формирования уступа.

2) Показатель геотехнического состояния уступа (F_c — Face Condition Factor)

Показатель F_c отражает физическое состояние и качество откоса, сформированного после взрыва, включая элементы, влияющие на устойчивость и безопасность. F_c рассчитывается как сумма рейтингов по следующим параметрам:

- наличие рыхлого или ослабленного материала на откосе;
- наличие нависаний и подработки нижней бровки;
- видимость следов щелевых скважин (индикатор эффективности контурного взрыва);
- трещины на верхней берме, возникшие после взрыва;
- раскрытие трещин по откосу;
- наличие скопившейся горной массы на берме;
- отклонение положения нижней бровки от проектного значения.

Каждому признаку присваивается балл на основе степени выраженности или воздействия (например, 0 — отсутствует, 5 — незначительное проявление, 10 — выраженное проявление). Суммарное значение F_c может достигать, как правило, максимум 100 баллов при удовлетворительном состоянии откоса.

3) Интерпретация результатов оценки качества постановки борта в конечное положение, показан на таблице – 2.12.

Таблица 2.12 – Интерпретация результатов оценки

Условия	Интерпретация
$F_d \geq 70$ и $F_c \geq 70$	Состояние борта оценивается как хорошее. Геометрия соответствует проекту, признаки переразрушения и нестабильности минимальны. БВР признаны эффективными.
$F_d \leq 50$ и $F_c \leq 50$	Состояние борта оценивается как плохое. Геометрия уступа нарушена, признаки нестабильности ярко выражены. Параметры буровзрывных работ требуют срочного пересмотра.
В остальных случаях	Состояние уступа оценивается как неудовлетворительное. Допустимы отклонения от проекта, но выявлены участки, требующие корректировки параметров бурения, зарядки или схемы инициирования. Необходима доработка откоса и пересмотр технологических решений.

3. Анализ влияния буровзрывных работ на устойчивость борта карьера на примере месторождения «Актогай»

3.1 Сравнительный анализ проектного и фактического положения борта

В рамках настоящего исследования был выполнен анализ соответствия проектной геометрии откосов карьера «Актогай» их фактическому положению после проведения буровзрывных работ. Объектом анализа выступает участок в юго-восточной части второй стадии карьера, на горизонтах 230–240, в границах блока 2230009 и смежного блока 2230010.

Геология данного участка представлена трещиноватыми и слабыми вулканитами — это группа вулканических пород, подвергшихся значительному нарушению монолитности в результате тектонических, температурных и сейсмических процессов, что проявляется в развитии естественной системы трещин различной протяжённости, частоты и ориентации.

На исследуемом участке месторождения «Актогай» представлен на рисунке 3.1. Геологический разрез представлен преимущественно вулканитами и представлена сложной систематичностью трещин.



Рисунок 3.1 – Расположение исследуемого участка

Сравнительный анализ проектного и фактического положения борта на исследуемом участке выполнялся с применением современных цифровых технологий и специализированного программного обеспечения, что обеспечило высокую точность геометрических сопоставлений и наглядность полученных результатов.

- Geovia Surpac — использовалось для импорта каркасных и геодезических данных, построения цифровых моделей рельефа и откосов, а также для выполнения сравнительного анализа (Reconciliation) между проектным контуром и фактической откосной поверхностью. Данное программное обеспечение позволило количественно оценить отклонения по углу, положению бровок и объёмам переразрушения.

- Gem4D — применялось для трёхмерной визуализации сопоставления проектной и фактической геометрии уступа, а также для анализа и демонстрации разрезов по ключевым профилям исследуемого блока. Это обеспечило удобную интерпретацию пространственного положения откоса и зоны переразрушения.

- фотограмметрия с использованием БПЛА (дронов) — использовалась для получения высокоточной модели фактической откосной поверхности, а также для фотодокументации щелевых скважин, показано на рисунке 3.2. На основе полученных ортофотопланов и облаков точек была выполнена оценка качества контурного взрыва, включая подсчёт успешно сработавших щелевых скважин.

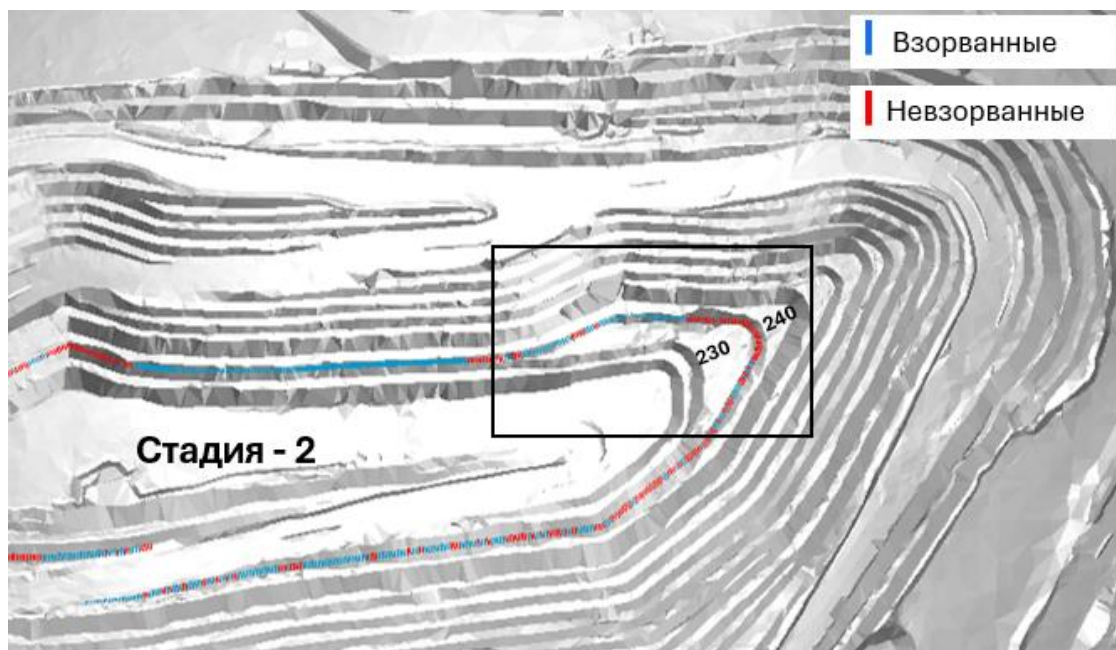


Рисунок 3.2 – Обзор на участок и результаты предварительного щелеобразования на горизонте 230–240

Как показано на рисунке 30, более 40% скважин предварительного щелеобразования оказались обрушенными и не были подорваны, что существенно снизило эффективность контурного взрыва. Для анализа был выбран наиболее неблагоприятный участок, где наблюдались максимальные отклонения от проектной геометрии.

Причинами обрушения и обвалов скважин стали:

- сложные геологические условия в зоне бурения, включая трещиноватые и ослабленные породы;
- перебуры скважин на верхних горизонтах, вызвавшие дестабилизацию стенок и потерю проходимости.

На основании полученного опыта было предложено внедрение корректирующих мер, в частности — установка пластиковых труб в устьях скважин после завершения бурения. Это решение позволяет предотвратить осыпание стенок и сохранить целостность скважин до момента зарядки, обеспечивая:

- 1) надёжную герметичность устья;
- 2) полноценное размещение заряда;
- 3) гарантированное срабатывание щелевых скважин по всей длине.

Применение данной рекомендации на следующих участках показало значительное снижение числа аварийных скважин и повышение эффективности формирования контурной линии отрыва.

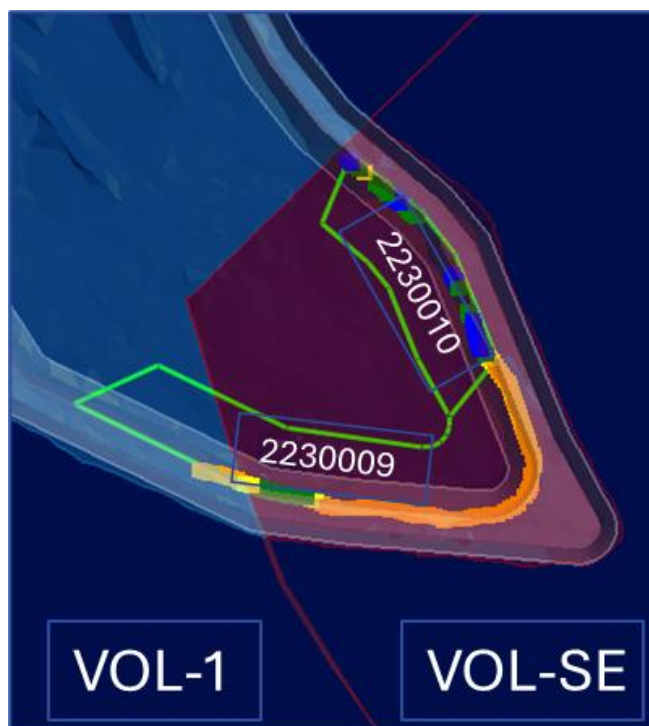


Рисунок 3.3 – Обзор на геологические условия участка

Сравнение проектной модели поверхности с геодезически снятой фактической геометрией показало значительные отклонения на блоке 2230009, где отклонения превышали на 5 метров. Основная причина отклонений — подбои, возникшие в результате недостаточно контролируемых буровзрывных работ, а именно — низкой эффективности предварительного щелеобразования на данном участке. Большинство щелевых скважин в блоке 2230009 не были взорваны или были частично разрушены, что привело к переразрушению массива и нарушению проектной геометрии уступа, показано на рисунке 3.4.

В отличие от этого, на смежном блоке 2230010 наблюдалось успешное срабатывание почти всех щелевых скважин, что позволило сохранить откос в пределах проектного профиля, без значительных зон переразрушения. Это подтверждает высокую эффективность предварительного щелеобразования при проведении контурного взрывания.

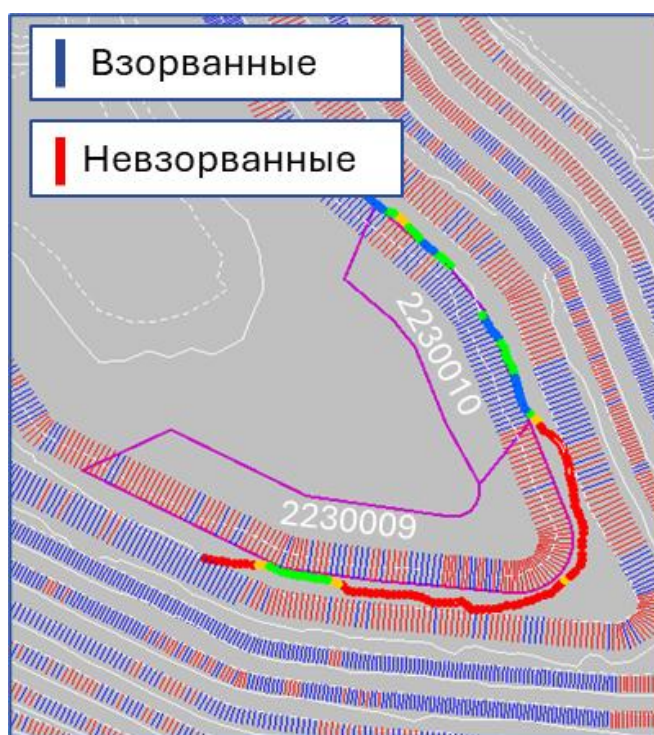


Рисунок 3.4 – Сравнительный анализ на исследуемом участке

Геологическое строение исследуемого участка представлено трещиноватыми вулканитами, характеризующимися низкой прочностью, развитой системой дискретных трещин и повышенной склонностью к переразрушению при динамическом воздействии. Однако, согласно геотехническому районированию, оба исследуемых блока относятся к одному геотехническому домену, что указывает на однородные инженерно-геологические условия.

Это позволяет сделать вывод, что выявленные отклонения обусловлены исключительно технологическими факторами, прежде всего — качеством реализации щелеобразования и параметрами БВР, а не различиями в природных условиях массива.

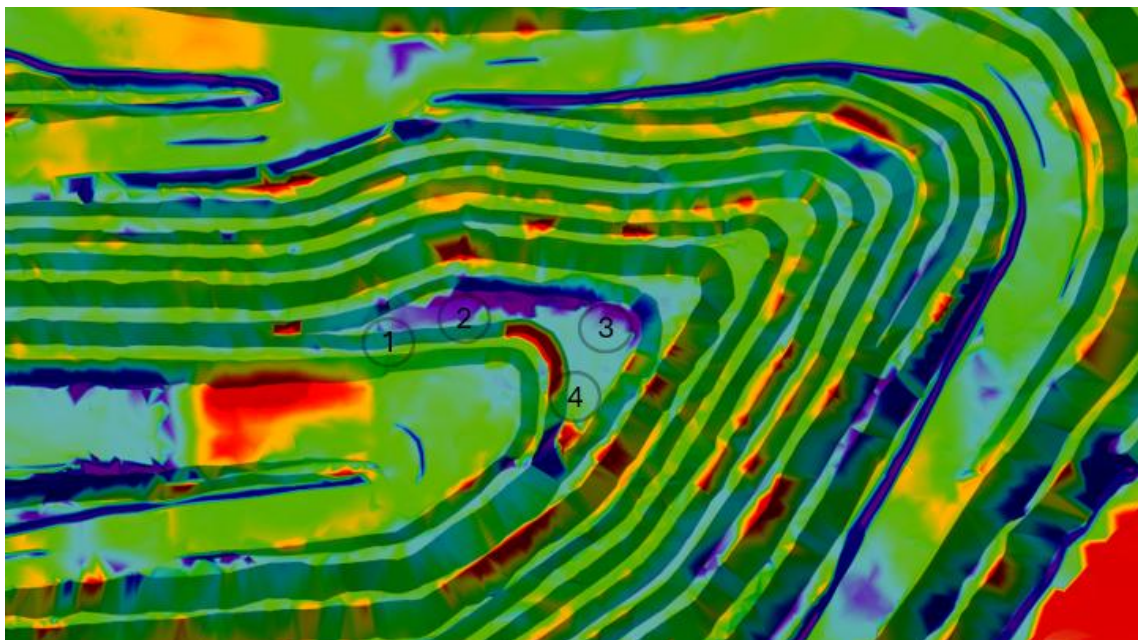


Рисунок 3.5 – Визуализация сравнительного анализа

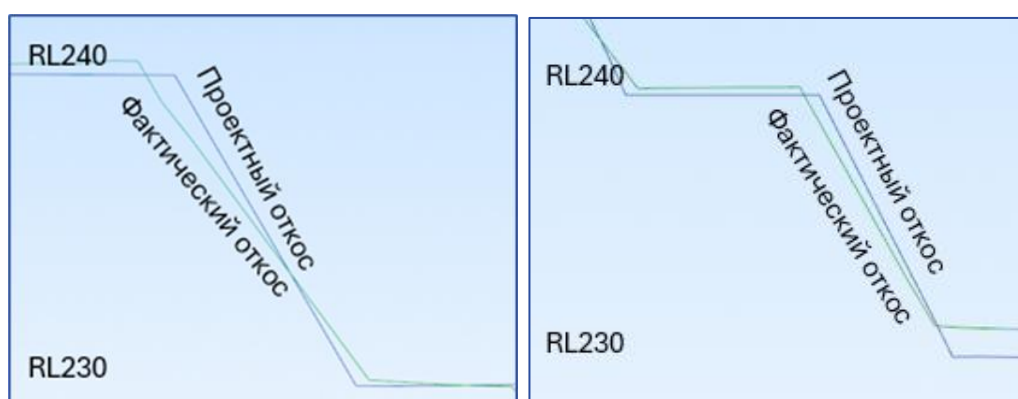


Рисунок 3.6 – Разрез участков 1 и 2 с высокой эффективностью щелеобразования скважин

Как показано на рисунке 3.6 отклонения геометрии откоса на данном участке являются минимальными. Максимальное отклонение по верхней бровке не превышает 1 метра от проектного значения. Это отклонение находится в пределах допустимых технологических норм и связано с высокой эффективностью предварительного щелеобразования, которое обеспечило контролируемое разрушение породы и точное формирование линии отрыва.

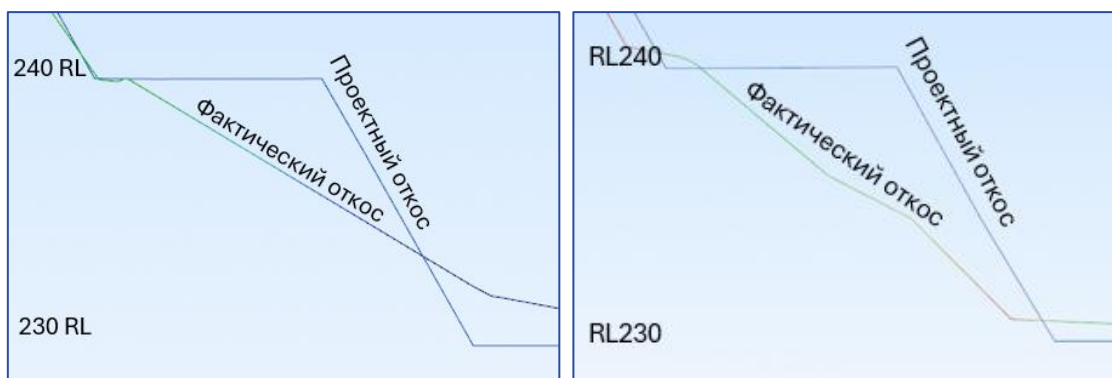


Рисунок 3.7 – Разрез участков 3 и 4 с низкой эффективностью
целеобразования скважин

На разрезах 3 и 4 продемонстрировано влияние недостаточного целеобразования при контурном взрывании на геометрию откоса. В указанных участках отклонения от проектного положения превышали 5 метров, что существенно выходит за пределы допустимых технологических норм и указывает на переразрушение массива.

Важно отметить, что геологическое строение и структура массива на этих участках аналогичны условиям разрезов 1 и 2. Таким образом, различие в результатах напрямую связано с низким уровнем реализации целевых скважин: показатель их успешного срабатывания в зоне разрезов 3 и 4 не превысил 20%.

Выводы по третьей главе

Проведённый анализ участка во второй стадии юго-восточного борта карьера «Актогай» (горизонты 230–240) показал, что качество формирования откоса напрямую зависит от эффективности предварительного целеобразования.

На участке блока 2230010, где большинство целевых скважин сработали успешно, отклонения от проектной геометрии были минимальны (не более 1 м). В то время как на блоке 2230009, с долей успешных скважин менее 20%, отклонения превышали 5 м, что указывает на разрушение массива и потерю геометрической точности.

Геологические условия на обоих участках аналогичны, что подчёркивает ключевую роль технологических факторов.

Таким образом, применение контурного взрывания с предварительным целеобразованием доказало свою эффективность как метод минимизации подбоев и обеспечения стабильности откосов при соблюдении требований к бурению и зарядке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей магистерской диссертации рассмотрено влияние буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера на примере юго-восточного участка второй стадии разработки месторождения «Актогай». Основной акцент сделан на сравнительном анализе эффективности контурного взрывания с применением предварительного щелеобразования и традиционных схем взрыва.

Проведённые геотехнические исследования, включающие обработку данных в программных обеспечениях, а также фотограмметрическую съёмку с использованием БПЛА, позволили получить точную информацию о фактической геометрии откосов и выявить отклонения от проектного профиля. Установлено, что на участках с низким процентом сработавших щелевых скважин (менее 20%) отклонения по верхней бровке превышали 5 метров, что сопровождалось выраженным переразрушением массива и снижением устойчивости откосов. В то же время, на участках с высокой эффективностью предварительного щелеобразования (более 80%) отклонения не превышали 1 метра, и геометрия уступов соответствовала проектным параметрам.

Анализ геологических условий показал, что массив сложен трещиноватыми вулканитами и относится к одному геотехническому домену, что исключает влияние различий в литологии на результаты и подчёркивает значимость технологических факторов: качество бурения, защита устья скважин, точность зарядки и выбор системы инициирования.

Предложенные технические решения, включая обязательное использование пластиковых труб для предотвращения обрушения скважин и внедрение регулярной геометрической оценки (Geotechnical Final Wall Assessment), направлены на оптимизацию параметров буровзрывных работ и минимизацию разрушений за пределами проектного контура.

Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность применения контурного взрывания с предварительным щелеобразованием для повышения точности формирования откосов, уменьшения зоны трещинообразования и обеспечения геотехнической устойчивости бортов. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования разработанных рекомендаций при планировании и реализации буровзрывных работ на аналогичных карьерах с трещиноватыми породами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Study on Three-Dimensional Dynamic Stability of Open-Pit High Slope under Blasting Vibration // *Lithosphere (GeoScienceWorld)*. — 2021. — Special Issue.
- 2 Multi-Factor Analysis on the Stability of High Slopes in Open-Pit Mines // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13(10). — Article 5940.
- 3 Шамаев М.К., Алимов Ш.М. Обеспечение устойчивости бортов при ведении буровзрывных работ // *Central Asian Journal of Theoretical and Applied Science*. — 2021. — Т. 2, № 4. — С. 83–88
- 4 Заиров Ш.Ш., Уринов Ш.Р., Номдоров Р.У. Формирование устойчивости бортов при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона // *Горные науки и технологии*. — 2020. — № 5(3). — С. 235–252
- 5 Australian Centre for Geomechanics. Guidelines for Open Pit Slope Design. — Ed. W. J. Lacy. — CSIRO Publishing, 2009. — 496 p.
- 6 Sanchidrián, J.A., Segarra, P., López, L.M. Contour blasting design based on precision, damage control and vibration management // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. — 2020. — Vol. 12(4). — pp. 715–726.
- 7 Б. Хусан, С.А. Мустафин, Г.Б. Ескенова, Ж.М. Асанова. Методика определения влияющих факторов на устойчивость бортов карьера при ведении буровзрывных работ // *Горный журнал Казахстана*. — 2024.
- 8 Уринов Ш.Р., Норов Ж.А., Халимова Н.Д. Исследование размеров зон ослабления прочности пород при взрывах скважинных зарядов // *Горный вестник Узбекистана*. — 2020, № 2. — С. 28–29
- 9 Шамаев М.К., Алимов Ш.М. Обеспечение устойчивости бортов при буровзрывных работах // *Central Asian Journal of Theoretical and Applied Science*. — 2021. — Т. 2, № 4. — С. 83–88
- 10 Hoek, E., Brown, E.T. *Underground Excavations in Rock*. — 3rd ed. — CRC Press, 2018. — 552 p.
- 11 “Study on the Influence of Stability for Higher Precipitous Open Pit Slope under Mining Blasting” // *Advanced Materials Research*. — 2024. — Vols. 255–260. — pp. 3822–3826.
- 12 Nielsen, K.S., Kristiansen, J. Presplit blasting in open pit mining: Optimization and limitations // *Mining Engineering*. — 2019. — Vol. 69(11). — pp. 34–40.
- 13 Lilly, P.A. An empirical method of assessing rock mass blastability // *Large Open Pit Mining Conference*. — AusIMM, 1986. — pp. 89–92.
- 14 “Analysing Slope Stability in Response to Blast-Induced Dynamic Loading by Pseudo-Static Approach” // published online circa 2020.

- 15 Lategan, B., Sellers, E. Slope monitoring and management in large open pits: Case studies from South Africa // *International Journal of Mining Science and Technology*. — 2020. — Vol. 28(5). — pp. 691–700.
- 16 Moser, P., Dinescu, R. Blast damage control using presplitting and smooth blasting techniques in weak rock masses // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2021. — Vol. 47. — pp. 152–162.
- 17 Konya, C.J., Walter, E.J. *Surface Blast Design*. — Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990. — 303 p.
- 18 Simser, B.P., Andrieux, P. Ground control strategies for weak rock masses at depth // *CIM Journal*. — 2008. — Vol. 3(1). — pp. 23–34.
- 19 Petropoulos, N., Fragoyannis, M. Evaluation of open pit slope design performance using drone-based photogrammetry // *Mine Planning and Equipment Selection*. — Springer, 2021. — pp. 125–134.
- 20 Sharma, S.P., Mandal, P.K. Slope monitoring technologies in open pit mines: A review // *Geotechnical and Geological Engineering*. — 2020. — Vol. 38. — pp. 2875–2890.
- 21 Malekian, M., Momayez, M., Bellett, P., Mancino, S. & Carrea, F. Stability Investigation of Open-Pit Slopes During Blasting Activities // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. — 2022.
- 22 “Relationship between blasting operation and slope stability: a case study at Borneo Indo Bara open pit coal mine” // *Scientific Reports / PubMed*. — 2024. — dynamic factor of safety assessed via Newmark method.
- 23 Fourie, A., Doherty, J. Improving the safety of final pit slopes through blast design optimization // *Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability*. — 2023. — pp. 98–107.
- 24 Singh, T.N., Kainthola, A. Blast-induced damage and its influence on slope design // *Environmental Earth Sciences*. — 2014. — Vol. 71. — pp. 1497–1505.
- 25 Дмитриев В.М., Суслов А.В. Контурное взрывание и предварительное щелеобразование в условиях устойчивости бортов карьеров // *Горная промышленность*. — 2020. — №5. — С. 20–25.