

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»

Батыргожинов Султан Серикович

Совершенствование технологии буровзрывных работ на
Актогайском месторождений медных руд

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07203 – «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 622.34.(043)

На правах рукописи

Батыргожинов Султан Серикович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)

На соискание академической степени магистра

Название диссертации:

Совершенствование технологии буровзрывных работ
на Актогайском месторождений медных руд

Направление подготовки:

7М07203 – «Горная инженерия»

Научный руководитель,

канд.техн.наук., профессор

Сандибек Сандибеков М.Н.

« 16 » 06 2025г.

Рецензент

канд.техн.наук., кафедры «Физики»,
КазНарЖенПУ

Заурбекова Заурбекова Н. Д.

« 16 » 06 2025г.

Норм контроль,

Ведущий инженер

Мендекина Мендекинова Д. С.

« 16 » 06 2025г.

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 Молдабаев С.К.

« 16 » 06 2025г.

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

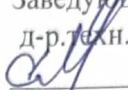
Кафедра «Горное дело»

7M07203 – «Горная инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ГД

д-р.техн.наук., профессор

 Молдабаев С.К.

«» 06 2025г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистрант Батыргожинов Султан Серикович

Тема: «Совершенствование технологии буровзрывных работ на Актогайском месторождении медных руд»

Утверждена приказом проректора по академическим вопросам № 548-П/Ө от 04.12.2023г.

Срок сдачи законченной диссертации «16» 06 2025г.

Исходные данные к магистерской диссертации: основная информация о месторождении, геологическое описание, методы ведения производства, буровзрывные работы.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Изучения геологических условий месторождения;
- б) Анализ буровзрывных работ на приконтурных блоках;
- в) Изучение программного обеспечения для определения гранулометрического состава;
- г) Оценка методов применения систем электронного инициирования;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- а) Геологическая карта месторождения Актогай;
- б) Конструкций заряда; результаты исследований и сравнительный анализ;
- в) Схема расположений скважин в приконтурных блоках;
- г) Результаты исследований фрагментации горной породы после взрывных работ, проведенных в полевых условиях;

Рекомендуемая основная литература:

1 В.А.Фокин, Г.Е.Тарасов, М.Б.Тогунов, А.А.Данилкин, Ю.А.Шитов: Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2015.

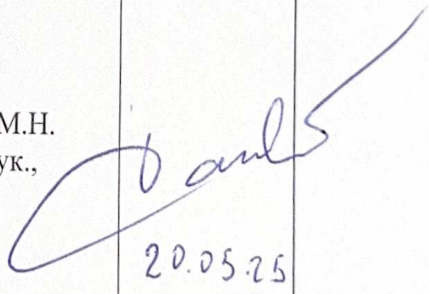
2 Ю.А.Масаев. Электродетонаторы с электронным замедлением (опыт промышленного применения) / Ю. А. Масаев, В. П. Доманов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2016. № 2. 2010. – С. 102–106.

ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

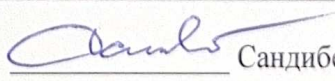
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ геологических, гидрогеологических, геомеханических и горнотехнических условий района Актогайского месторождения.	02.01.2024г. 16.01.2024г.	
Проанализировать существующие методы ведения буровзрывных работ на приконтурных блоках и их влияние на устойчивость откосов.	01.05.2024г. 17.05.2024г.	
Разработать оптимальную конструкцию заряда и технологию ведения взрывных работ, обеспечивающих устойчивость уступов и минимизацию негативного воздействия на массив контура карьера.	03.12.2024г. 18.12.2024г.	
Анализ и область применения программного обеспечения для определения гранулометрического состава взорванных горных пород в карьерах.	02.01.2025г. 17.01.2025г.	
Анализ и оценка методов применение систем электронного инициирования для улучшение гранулометрического состава взорванных горных пород.	28.04.2025г. 12.05.2025г.	

Подписи

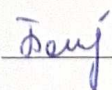
консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Геологические условия месторождения.	Сандибеков М.Н. канд.техн.наук., проф.	20.05.25	
Анализ буровзрывных работ на приконтурных блоках.			
Анализ и область применения программного обеспечения для определения гранулометрического состава.			
Анализ и оценка методов применение систем электронного инициирования.			
Норм контролер	Мендекинова Д.С. ведущий инж.	13.06.25г.	

Научный руководитель

 Сандибеков М.Н.

Задания принял к исполнению обучающийся

 Батыргожинов С.С.

Дата

« 16 » 06 2025г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Исследование особенности геологического строения месторождения Актогай	11
1.1	Общие сведения о месторождении	11
1.2	Геологическое строение района месторождения	13
1.3	Гидрогеологическое строение месторождения	15
1.4	Инженерно-геологические и горнотехнические условия месторождения	16
2	Анализ взрывных работ на приконтурных блоках карьера Актогай.	18
2.1	Базовые параметры размещения, заряжания и инициирования скважинных зарядов в приконтурных блоках	18
2.2	Механизмы взрывного разрушения	19
2.3	Формирование откосов уступов на предельном контуре карьера	24
3	Анализ и область применения программного обеспечения для определения гранулометрического состава взорванных горных пород в карьерах по добыче меди	34
3.1	Принцип работы и возможности программного обеспечения <i>ShovelMetrics</i> TM для определения гранулометрического состава взорванных горных пород на месторождении Актогай	34
3.2	Методика проведения анализа гранулометрического состава взорванных горных пород	36
3.3	Результаты анализа гранулометрического состава в карьере Актогай	38
3.4	Улучшение гранулометрического состава взорванных горных пород, изменение конструкции скважинных зарядов	40
3.5	Обоснование экономических преимуществ, достигнутых в результате применения программы	43
4.0	Анализ и оценка методов применения систем электронного инициирования для улучшения гранулометрического состава взорванных горных пород	44
4.1	Функциональные и технические возможности системы электронного инициирования <i>I-KON</i> TM	44
4.2	Оптимизация схемы инициирования	52
4.3	Практические результаты по данным буровзрывных работ	53
	Заключение	
	Список использованной литературы	

АНДАТПА

Бұл магистрлік диссертацияда контурлық жарылыс технологиясын енгізу арқылы бұрғылау-жару жұмыстарының тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылады. Бұрғылау-жару жұмыстарын оңтайландыру және тау-кен массасын ұсақтау сапасын арттыру мақсатында Ақтоғай кенішінде *I-KON*TM ұңғыма зарядтарын бастаудың электрондық жүйесін қолданудың тиімділігіне зерттеу жүргізілді. Жұмыс фрагментация мәселелерін талдауды, қысқа жарылыс параметрлерінің гранулометриялық құрамның таралуына әсерін, сондай-ақ жарылыс нәтижелерін бақылау үшін *ShovelMetrics*TM жүйесінің қолданылуын бағалауды қамтиды. Ұңғымалар мен бұрғылау паспорттарының әртүрлі орналасу схемаларын қолдана отырып, тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтар жүргізілді, олардың нәтижелері бойынша контур сапасы мен тау жыныстарының ұсақталу дәрежесі бойынша жақсартылған көрсеткіштерді қамтамасыз ететін оңтайлы нұсқа таңдалды. Жарылыстан кейінгі тау массасының фрагментациясын бағалау үшін *ShovelMetrics*TM жүйесін қолдану да зерттелді. Ұсынылған зарядтарды бастау технологиясын енгізу бастапқы ұсақтау нәтижелерін жақсартуға және тау-кен жұмыстарының өнімділігін арттыруға ықпал етті.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации рассматриваются вопросы повышения эффективности буровзрывных работ путём улучшения, существующих технологии контурного взрывания. Проведено исследование эффективности применения электронной системы инициирования скважинных зарядов *I-KON*TM на руднике Актогай с целью оптимизации буровзрывных работ и повышения качества дробления горной массы. Работа включает анализ проблем фрагментации, влияние параметров короткозамедленного взрывания на распределение гранулометрического состава, а также оценку применения системы *ShovelMetrics*TM для мониторинга результатов взрывов. Проведены опытно-промышленные испытания с использованием различных схем расположения скважин и паспортов бурения, по результатам которых выбран оптимальный вариант, обеспечивающий улучшенные показатели приконтурных блоков и степени их дробления породы. Также изучено применение программы *ShovelMetrics*TM для оценки гранулометрического состава горной массы после взрыва. Внедрение рекомендованной технологии инициирования зарядов способствовало улучшению результатов первичного дробления и повышению производительности горных работ.

ANNOTATION

This master's thesis explores methods for improving the efficiency of drilling and blasting operations through the implementation of contour blasting techniques. A study of the effectiveness of the *I-KON*TM electronic borehole charge initiation system at the Aktogay mine to optimize drilling and blasting operations and improve the quality of rock mass crushing. The work includes analysis of fragmentation problems, the effect of short delay blasting parameters on particle size distribution, and an evaluation of the use of *ShovelMetrics*TM to monitor blast results. Industrial-scale tests were conducted using various drilling patterns and blast designs, resulting in the selection of an optimal configuration that ensures improved contour quality and rock fragmentation. The study also examines the application of the *ShovelMetrics*TM system to assess rock fragmentation after blasting. The adoption of a recommended initiation technology for explosive charges further enhanced the outcomes of primary rock breakage and increased overall mining productivity.

ВВЕДЕНИЕ

Буровзрывные работы являются важнейшим технологическим этапом при ведении открытых горных работ, оказывающим непосредственное влияние на эффективность последующих процессов дробления горной массы. Особую значимость приобретают взрывные работы на приконтурных блоках карьера, где наряду с необходимостью качественного дробления породы требуется обеспечить сохранность и устойчивость откосов уступов, особенно в условиях достижения предельных границ карьера.

Одной из актуальных задач современной взрывной технологии является совершенствование методов заряжания и инициирования скважинных зарядов, в том числе на приконтурных участках. Применение традиционных методов, разработанных для рабочих зон, на предельном контуре зачастую приводит к переупрочнению массива, увеличению объёма выбросов и рискам разрушения устойчивости бортов. В этой связи возрастает интерес к новым техническим решениям, включая использование высокоточных электронных систем инициирования, таких как *I-KON™*, позволяющих реализовывать точную задержку взрыва и минимизировать воздействие взрывных работ на законтурный массив.

Отдельное внимание в исследовании уделяется проблеме фрагментации горной массы. Качество дробления существенно влияет на затраты на транспортировку и переработку, а также на эффективность работы экскаваторно-автомобильного комплекса. В связи с этим актуальными являются методы анализа и оптимизации фрагментации, включая применение интеллектуальных систем, таких как Motion Metrics, для оперативного контроля кусковатости породы после взрыва.

Кроме технических аспектов, важное место в работе занимает анализ условий охраны труда и техники безопасности при производстве буровзрывных работ. Использование современных средств инициирования и оптимизация технологии зарядки скважин позволяют не только повысить производственные показатели, но и значительно снизить уровень риска для персонала.

Таким образом, исследование методов заряжания и инициирования скважинных зарядов на приконтурных блоках, анализ технологии ведения взрывных работ и фрагментации горной массы, а также внедрение современных электронных систем инициирования представляет собой актуальную и практически значимую задачу в условиях глубоких карьеров, таких как Актогайское медное месторождение.

Цель работы. Технология совершенствования буровзрывных работ — это совокупность технических и организационных мероприятий, направленных на повышение эффективности, безопасности и качества выполнения буровзрывных работ за счёт совершенствования всех этапов - от проектирования до анализа результатов. Целью данной магистерской диссертации является комплексный анализ и совершенствование

буровзрывных работ на месторождении Актогай посредством применения современных технологий, включая электронные системы *инициирования I-KON™* и систему анализа гранулометрического состава взорванных горных пород *ShovelMetrics™*, с целью повышения эффективности дробления горных пород, обеспечения устойчивости откосов карьера и улучшения экономических и производственных показателей.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели в рамках данной работы необходимо решить следующие задачи.

Провести анализ горно-геологических и горнотехнических условий разработки Актогайского месторождения, влияющих на эффективность буровзрывных работ на приконтурных блоках.

Проанализировать существующие методы ведения буровзрывных работ на приконтурных блоках и их влияние на устойчивость откосов.

Разработать оптимальную конструкцию заряда и технологию ведения взрывных работ, обеспечивающую устойчивость уступов и минимизацию негативного воздействия взрывных работ на контур карьера.

Анализ и изучение программы для определения гранулометрического состава взорванных горных пород в карьерах по добыче меди.

Анализ и оценка методов применения современных систем электронной системы инициирования для повышения точности и безопасности взрывных работ.

Провести опытно-промышленные испытания с целью проверки эффективности предложенной технологии и определить оптимальные параметры буровзрывных работ.

Разработать рекомендации по внедрению полученных результатов в производственные условия, с учётом требований охраны труда и техники безопасности.

Научная новизна исследовательской работы. Заключается в разработке и обосновании новых подходов к буровзрывным работам на приконтурных блоках глубоких карьеров, а также в совершенствовании технологий инициирования зарядов взрывчатых веществ в условиях Актогайского месторождения. Предложены и экспериментально обоснованы:

Методы заряжания и инициирования скважинных зарядов, специально адаптированные для ведения взрывных работ на предельных контурах карьера, что позволяет обеспечить сохранность законтурного массива и предотвратить разрушение бортов.

Применение системы Motion Metrics для мониторинга и анализа фрагментации породы после взрыва даёт возможность оперативно оценить качество дробления и внести корректировки в параметры взрывных работ.

Использование электронной системы инициирования *I-KON™*, обеспечивающей высокую точность и безопасность в процессе буровзрывных работ, что значительно снижает риски аварийных ситуаций и повышает технологическую эффективность.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки более эффективных и безопасных технологий буровзрывных работ в условиях предельных контуров глубоких карьеров, что имеет важное значение для устойчивого и экономически эффективного ведения горных работ.

Актуальность работы. В условиях глубоких карьеров, таких как Актогайское месторождение, значительно возрастает важность технологически обоснованного подхода к взрывным работам на приконтурных блоках, где необходима не только высокая степень дробления горной массы, но и сохранность устойчивости откосов. Ведущим фактором успешной разработки месторождений становится минимизация негативного воздействия на борт карьера, что требует поиска новых методов и технологий для оптимизации буровзрывных работ на предельных контурах.

Современные методы взрывных работ, разработанные для более мелких и менее глубоких карьеров, не всегда дают удовлетворительные результаты при применении на предельных контурах. Наряду с этим, в последние десятилетия наблюдается внедрение более дешевых взрывчатых веществ, изготавливаемых на месте, а также новых средств инициирования, что открывает перспективы для оптимизации буровзрывных операций и повышения безопасности горных работ.

Кроме того, с увеличением глубины карьеров возникают вопросы относительно проектирования предельных углов откосов, выбора методов их безопасного формирования и технологий инициирования зарядов, что делает проблему актуальной для горнодобывающих предприятий, работающих в условиях крупных карьеров.

Таким образом, совершенствование технологии буровзрывных работ на приконтурных блоках, включая использование новых систем инициирования и методов фрагментации, представляет собой важную и актуальную задачу, направленную на повышение эффективности и безопасности работы карьеров.

Научная ценность работы. Разработка и обоснования новых подходов к буровзрывным работам на предельных контурах глубоких карьеров, что способствует повышению их эффективности и безопасности. Предложены улучшенные методы заряжания и инициирования скважинных зарядов, учитывающие специфические горно-геологические условия Актогайского месторождения, позволяют более точно прогнозировать и контролировать результаты взрывных работ.

Особое значение имеет разработка технологии фрагментации горной массы, которая не только оптимизирует процесс дробления, но и минимизирует негативное воздействие на устойчивость откосов карьера, что существенно улучшает эксплуатационные характеристики карьеров на различных этапах их эксплуатации. Применение системы Motion Metrics для анализа фрагментации позволяет проводить оперативный мониторинг и корректировку параметров буровзрывных работ, что представляет собой значительный вклад в повышение технологической эффективности.

Также важным аспектом является использование электронной системы инициирования *I-KON™*, что значительно повышает точность и безопасность взрывных работ, а также снижает риски аварийных ситуаций. Внедрение этой технологии позволяет улучшить условия труда и сократить экологические риски, что является важным вкладом в устойчивое развитие горной отрасли.

Полученные результаты исследования открывают новые возможности для оптимизации буровзрывных работ на предельных контурах, а также для более эффективного проектирования и эксплуатации глубоких карьеров. Это имеет большое значение для горнодобывающих предприятий, работающих в сложных горно-геологических условиях.

Практическая ценность работы. Заключается в разработке и внедрении эффективных методов буровзрывных работ на приконтурных блоках, что позволяет повысить качество дробления породы и сохранить устойчивость откосов на предельных границах карьеров. Применение предложенных технологий, включая использование системы Motion Metrics для мониторинга фрагментации и электронной системы инициирования *I-KON™*, улучшает безопасность, снижает экологические риски и повышает производительность. Результаты работы могут быть использованы на Актогайском медном месторождении и других глубоких карьерах для повышения эффективности добычи и улучшения условий труда.

Научные публикации по теме диссертации.

1) Батыргожинов Султан Серикович. «Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьера». Международный журнал АКАДЕМИК, №2, 273. 05.04.2025г.

2) Сандибеков Манарбек Назарбекович, Батыргожинов Султан Серикович «Определение гранулометрического состава взорванных горных пород в режиме реального времени с использованием программы motion metrics». Международная конференция «Современные тенденции и актуальные проблемы машиностроения Узбекистана», 13–14 мая 2025 год, Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета имени И.Каримова.

1 Исследование особенности геологического строения месторождения Актогай

1.1 Общие сведения о месторождении

Актогайское месторождение представляет собой один из крупнейших проектов открытой добычи полезных ископаемых, реализуемых компанией KAZ Minerals. Его промышленное освоение началось спустя год после ввода в эксплуатацию рудника Бозшаколь. Объект расположен на территории Восточного Казахстана, на расстоянии приблизительно 450 км от города Алматы. Основной путь транспортного сообщения с рудником осуществляется по железнодорожной ветке.

Принятая система разработки на Актогайском карьере основана на классическом механизированном способе с применением мощной землеройно-транспортной техники, карьерных экскаваторов и автосамосвалов, оснащённых ударопрочными корпусами. Указанная технология продолжает традиционную практику открытой добычи и в настоящее время успешно применяется в ходе горных работ.

С учётом протяжённости зон минерализации на рассматриваемом месторождении, для извлечения как рудных, так и вскрышных пород используется метод массовой выемки, основанный на применении забойных экскаваторов. По результатам анализа технологических и геомеханических параметров, а также технико-экономического обоснования выбора оборудования, определено, что допустимым является ведение буровзрывных работ уступами высотой до 10 метров. Исключения составляют участки, где сложный рельеф требует корректировки высоты первичных уступов. Такой подход позволяет достичь оптимального баланса между производительностью и затратами, обеспечивая эффективную организацию буровзрывного цикла.

Следует отметить, что внутренняя отвалка вскрышных пород в настоящее время не предусмотрена. Это объясняется тем, что в пределах проектного контура конечной стадии карьера запасы полезных ископаемых ещё не исчерпаны. В долгосрочной перспективе, при возможной корректировке классификации минеральных ресурсов или изменении экономических условий, может быть рассмотрен вариант расширения карьера, что обеспечит гибкость и устойчивость проекта на последующих этапах его реализации [1].

Для плана горных работ на руднике Актогай выбран способ разработки, который является продолжением традиционного метода с применением самосвалов и экскаваторов с ударопрочным корпусом. Данный способ успешно используется в текущих горных операциях.

Учитывая широкие зоны минерализации на месторождении Актогай, для разработки как рудных, так и пустых пород, был выбран метод массовой разработки с использованием забойных экскаваторов. Согласно этому методу и предварительным оценкам выбора техники, допускается формирование

уступов высотой до 10 метров для большинства видов работ, за исключением тех участков, где рельеф местности влияет на исходную высоту уступов. Это решение позволяет обеспечить экономически эффективное проведение буровзрывных работ.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость проведения выборочной разработки в переходной зоне между окисленными и сульфидными рудами (транзитная зона). Поскольку эта зона занимает значительную площадь карьера, её массовая разработка может привести к существенному разубоживанию руд. В связи с этим предполагается выполнение выборочной разработки с понижением высоты уступов до 5 метров, что будет зависеть от результатов более детального эксплуатационного геологоразведочного контроля и уточнения контуров рудных тел. Парк горной техники будет оснащён необходимым оборудованием, что позволит при необходимости проводить такую выборочную разработку в соответствии с рисунком 1.1.



Рисунок 1.1 – Общий вид Актогайского месторождения

Данный подход способствует снижению разубоживания и более точному определению содержания различных типов руд. Чтобы избежать излишнего разубоживания в местах соприкосновения с невзорванной породой в подошвенной части, взрывные работы в выделенных зонах продолжают выполняться на уступах высотой 10 метров, даже если на рельефе предусмотрены уступы меньшей высоты [1].

Для поддержки основного парка горной техники (экскаваторы, самосвалы и буровые станки) будет использоваться ряд вспомогательного оборудования, включая следующее:

- бульдозеры для строительства карьерных дорог, очистки зоны погрузки, мероприятий по управлению пустой породы, отвала забалансовой

руды, техобслуживания участка выщелачивания и осушению;

- колесный бульдозер для содействия в очистке зон погрузки;
- грейдеры для строительства и техобслуживания дорог;
- водовозы для пылеподавления;
- пескоразбрасыватель;
- автомобили техпомощи для заправки и смазки выбранного мобильного горного оборудования;
- осветительные установки;
- дренажные насосы и соответствующая инфраструктура;
- автомобиль для перевозки взрывчатых веществ до взрывной скважины и забоечная машина (во владении или управлении подрядчика по взрывным работам);

Внутреннее отвалообразование не принято, в виду того, что минеральные ресурсы в конечном контуре карьера по проекту расширения рудника Актогай не истощены, и существует возможность для будущего расширения карьера, в случае изменения классификации запасов или экономических критериев в течение срока эксплуатации рудника [1].

1.2 Геологическое строение района месторождения

Для построения геологической карты использовалась государственная геологическая карта территории масштаба 1:200000 (М.Б.Стааль, 1958; А.А.Розенкранц, 1959) отредактирована в 1979 году (Л.М.Скляренко и др.). Район месторождения закартирован и опоискован в масштабе 1:50000 (М.Б. Мычник и др., 1976). Рудное поле картировалось в 1975–1978гг. в масштабе 1:10000 (А.М.Красников и др., 1979). В данном отчете материалы геологической съемки масштаба 1:10000 трансформированы в масштаб 1:25 000. Участок месторождения картировался в масштабе 1:2000 исполнителями Актогайской ГРП в 1975–1979гг. (В.К. Щульга, Б.С.Варновских, П.Н.Сметливый, Л.А. Сергеев, В.Ф.Зябкин). Окончательный вариант карты, увязанный с разрезами, погоризонтными планами с учетом массового пересмотра шлифов и переинтерпретации геофизических материалов составлен В.Ф.Зябкиным и Т.М.Волькиной. Материалы геологической съемки масштаба 1:2000 трансформированы в масштаб 1:5000.

При составлении геологических карт всех масштабов использовались материалы аэрофотосъемки и результаты дешифрирования космо и аэрофотоматериалов (Ф.М. Ибрагимов и др., 1979), а также результаты интерпретации материалов площадных геофизических работ ЮККГТЭ масштабов 1:50 000–1:10 000. Комплексная интерпретация материалов геофизических работ осуществлялась на ЭВМ КОМЭ Мингео КазССР.

В течение 1975–1979гг. изучением геохимии и вещественного состава руд и вмещающих пород занимались сотрудники КазНИИМСа и ИМГРЭ (А.И.Полетаев, Е.М.Поплавко и др.; Б.Кайрамбаев, 1979).

Эндогенные ореолы рассеяния изучались ЦКГТЭ (Ф.Ф.Митрофанский,

Р.А.Ивлев).

Вопросы геолого-структурной позиции рудного поля и месторождения изучались сотрудниками КазНИИМСа (А.И.Полетаев и др., 1979), ЦНИГРИ (А.И.Кравцов и др., 1978) и Илийской геофизической экспедиции ЮКТГУ

(В.А.Боронаев, 1979). Глубинное строение рудного поля освещено сейсморазведкой МОВ (Н.В.Осинин и др., 1979) и методом заряда (Ю. А. Калашников и др.). Через восточную оконечность рудного поля в 1979 году прошел профиль ГСЗ Талды-Курган-Усть-Каменогорск (ИФЗ АН КазССР).

Межскважинное пространство месторождения изучалось ЮККГГЭ методами электрической корреляции, а в опытном плане – методами КСПК и радиопросвечивания.

Геологические и геофизические данные показывают, что Колдарский интрузивный массив представляет собой лакколит, состоящий из диорита и гранодиорита в соответствии с рисунком 1.2. Открытая часть этой интрузии простирается с запада на восток примерно на 17 км и занимает площадь в 75 км². С двух сторон месторождения Актогай, внутри того же массива, находятся два сопутствующих медно-порфировых месторождения: Айдарлы, 3 км на западо-северо-запад, и Кызылкия, 5 км на восток-северо-восток. Геофизические данные показывают, что лакколит утолщается и распространяется по площади в 216 км² на глубине от 1 до 2 км ниже его открытой вершинной части, а затем резко уменьшается в размерах, переходя в три жилы. Основная жила расположена между Айдарлы и Актогай и простирается на глубину по крайней мере 4,7 км. Подъем магмы выгнул крышу интрузивного массива и сформировал горст-антиклиналь. Позднее небольшая кальдероидная депрессия сформировалась к востоку от основной жилы. Кальдера охватывает площадь в 5,5 км², включая большую часть месторождения Актогай; она заполнена вулканическими и осадочными породами Керегетасской свиты толщиной до 600 м, что получило название Центрально-Актогайский ксенолит [1].

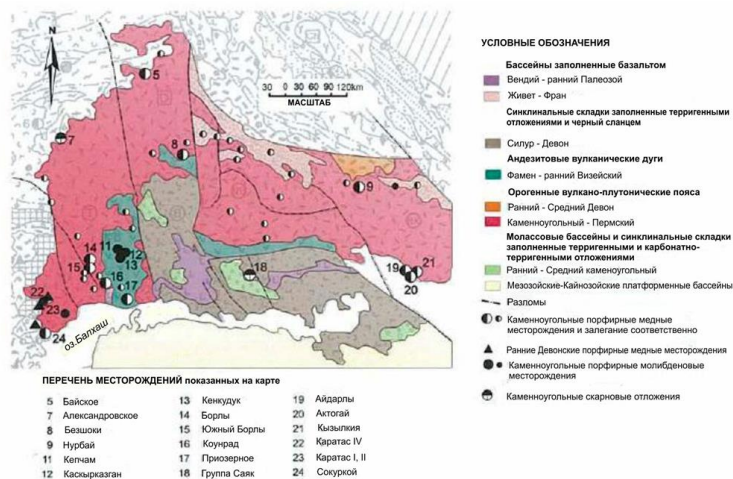


Рисунок 1.2 – Схематическая геологическая карта Балхашского вулканического глубинного пояса (по Кудрявцеву, 1996г.)

Инженерно-геологические условия освоения Актогайского месторождения формируются за счёт метасоматически изменённых вулканогенных и интрузивных пород, пересечённых системой тектонических разломов преимущественно субширотного направления. Осадочно-вулканогенные образования сохраняются в виде фрагментов кровли, размещённых на внедрившихся интрузивных массивах.

Осадочно-вулканогенные породы включают туфы, туфолавы, а также лавовые образования кислого и среднего химического состава. Интрузивный комплекс представлен преимущественно мелко- и среднезернистыми диоритами, диоритовыми порфиритами и гранодиоритами. Кроме того, в пределах месторождения распространены дайковые тела, сложенные диабазовыми и андезитовыми порфиритами, мощность которых варьируется от нескольких метров до десятков метров.

По степени прочности горные породы на месторождении классифицированы на две основные группы. К первой группе относятся высокопрочные породы с пределом прочности при сжатии свыше 800 кг/см². Ко второй группе отнесены породы средней прочности, для которых данный показатель составляет менее 800 кг/см².

Соответственно плотность пород и руды первой группы характеризуется плотность 2,6 т/м³, второй группы – 2,65 т/м³. Крепость пород первой группы по шкале проф. М.М. Протодяконова составляет 8–12, класс буримости X–XI, крепость пород второй группы по шкале проф. М.М.Протодяконова составляет 5–6, класс буримости - IV-VI [1].

1.3 Гидрогеологическое строение месторождения

Актогайское месторождение расположено в центральной части водораздела Колдарского гранитоидного массива, где абсолютные отметки рельефа колеблются в пределах от 420 до 455 метров. С точки зрения геоморфологии, участок разработки представляет собой денудационную равнину на фоне мелкосопочника. С севера и юга мелкосопочник переходит в равнинные области аккумулятивного происхождения: на севере — в аллювиально-пролювиальные отложения среднего и верхнего четвертичных периодов, связанных с Акогойской впадиной; на юге — в озёрные отложения сора Кылы. Уклоны поверхности составляют 0,522 на север и 0,150 на юг. Водоразделы возвышаются над местным базисом эрозии на 120–130 метров.

На расстоянии около 8 километров к северо-востоку от участка располагается солёное озеро Колдар, которое питается за счёт талых и паводковых вод реки Тансык. Иных постоянных поверхностных водотоков поблизости не зафиксировано.

Месторождение характеризуется низкой степенью обводнённости, что обусловлено отсутствием постоянных водотоков, скудным количеством атмосферных осадков (в среднем 10 мм), а также наличием малопроницаемых покровных отложений и закупоркой трещин выветрившимися и

гидротермально изменёнными породами. В зоне открытой трещиноватости верхнекаменноугольных — нижнепермских отложений (C_3-P_1) в юго-восточной части месторождения, за Южно-Колдарским разломом, развиты подземные воды с повышенной минерализацией [1].

Дренаж проектируемых карьеров осуществляется с помощью организованного открытого водоотлива, который ведётся параллельно с горными работами. В этих целях планируется использование мобильных насосных установок. В карьер поступают как подземные воды, так и поверхностные воды, возникающие в результате таяния снега и выпадения дождей.

Проектный расчёт насосного оборудования базируется на оценке максимально возможного суммарного водопритока в карьер, с разбивкой по отдельным чашам карьера. Общий водоприток включает поступление подземных вод и долю атмосферных осадков, как предписано в Нормативах технологического проектирования. Фактический (нормальный) водоприток, как правило, существенно ниже расчётного значения.

Карьерная вода, собранная в зумпфах и отстойниках, направляется на пылеподавление как в пределах карьера (зоны БВР, внутренние дороги, забои), так и за его пределами (внешние дороги, отвалы). В случае нехватки объема карьерной технической воды предусматривается частичное восполнение дефицита за счёт ресурсов Жузагашского водозабора. Сводный водный баланс технической воды для карьера представлен в таблице 1.1 [1].

Таблица 1.1 – Общий баланс карьерной (технической) воды

Источник	Ед. изм.	2023	2024	2025	2026	2027
Общие карьерные водопритоки	м³/сутки	720	810	820	780	870
Жузагашский водозабор	м³/сутки	122	150	112	177	185
Расход воды на пылеподавлен	м³/сутки	767	812	855	902	915

1.4 Инженерно-геологические и горнотехнические условия месторождения

Инженерно-геологические условия разработки месторождения Актогай обусловлены метасоматически переработанными вулканогенными и интрузивными породами, разбитыми серией тектонических нарушений в основном субширотного направления. Вмещающие осадочно-вулканогенные породы залегают в виде останков кровли на рвущих их интрузивных образованиях. Первые представлены туфами, туфолавами и лавами кислого и среднего составов. К комплексу интрузивных пород относятся мелко и среднезернистые диориты, диоритовые порфиристы, гранодиориты. Дайковые

тела представлены диабазовыми и андезитовыми порфиритами. Мощности их колеблются от нескольких метров до первых десятков метров. Геологическое строение месторождения отличается сложными пространственными взаимоотношениями контуров как в плане, так и на разрезах. Контакты пород часто трудно уловить из-за близости вулканогенных и интрузивных пород по химизму и физическим свойствам.

К тектоническим нарушениям приурочены многочисленные зоны разновозрастных, в т. ч. литифицированных брекчий, разбивающих массив на отдельные блоки менее трещиноватых пород. Отсюда представляется возможным районирование скального массива на участки со схожими инженерно-геологическими свойствами пород, в т. ч. трещиноватостью и прочностными свойствами.

Форма рудного штока и глубина залегания руд предопределили разработку месторождения открытым способом до глубины 585 м. Площадь, охваченная инженерно-геологическими исследованиями, более 7 км².

Все породы месторождения разделены на две группы:

- первая группа сложена крепкими породами с пределом прочности на сжатие более 800 кг/см²;
- вторую группу составляют породы средней крепости с пределом прочности менее 800 кг/см²;

2 Анализ взрывных работ на приконтурных блоках карьера Актогай

2.1 Базовые параметры размещения, заряжания и инициирования скважинных зарядов при взрывании приконтурных блоков

Скважинные заряды, применяемые при дроблении горных пород, характеризуются рядом ключевых технологических параметров. К их числу относятся: параметры бурения, включающая расстояния между соседними скважинами в пределах одного ряда, а также между рядами; величина перебура; интервалы замедления между последовательными взрывами зарядов или их групп; параметры зарядов, закладываемых в скважины первого ряда; а также расстояние от приконтурного ряда вертикальных зарядов до вертикальной контурной щели.

Значения указанных параметров напрямую зависят от расчётного удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ), необходимого для дробления породы. Этот показатель отражает энергоёмкость разрушения конкретного типа горных пород и комплексно учитывает начальные условия проведения взрывных работ [2].

В случае отработки приконтурных уступов, где их форма и положение заранее задаются посредством наклонной отрезной (контурной) щели, возможно применение так называемых буферных скважин в соответствии с рисунком 2.1. Основное назначение таких скважин — разрушение пород в верхней части уступа перед контурной щелью. Это способствует снижению воздействия основного взрыва на борт карьера, формируя более устойчивый контур с минимальной переуплотнённостью прилегающих массивов.

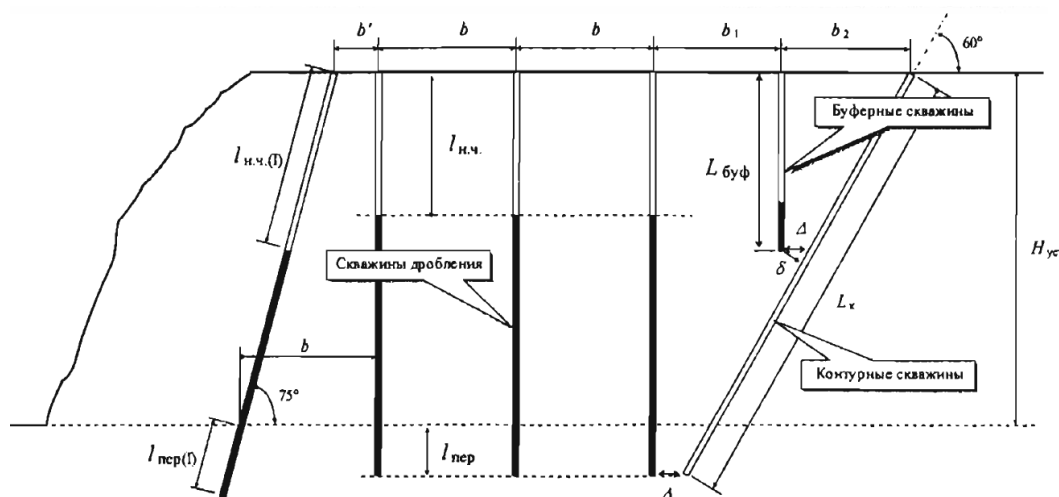


Рисунок 2.1 – Пример использования буферных скважин

Основной целью контурного взрывания является формирование качественных откосов уступов, соответствующих проектному положению, а также обеспечение их целостности в процессе взрывания прилегающих блоков. Для достижения этого используется метод предварительного образования контурной (отрезной) щели посредством взрыва нисходящих скважинных зарядов, размещённых параллельно друг другу в плоскости предполагаемого откоса.

Контурные скважины заряжаются линейными зарядами специальной конструкции, отличающимися сниженной линейной плотностью заряда, то есть массой взрывчатого вещества на один метр длины. Наиболее технологически эффективным считается использование сплошных колонковых зарядов, которые обеспечивают равномерное динамическое воздействие на породу вдоль всей глубины скважины, способствуя формированию ровного и устойчивого откоса.

К числу основных параметров, определяющих эффективность контурного взрывания, относятся: диаметр зарядов, шаг между соседними контурными скважинами. Следует отметить, что все эти характеристики находятся в прямой зависимости от диаметра бурения контурных скважин [1].

Диаметр (d_0 , м) зарядов сплошной колонковой конструкции рассчитывается по специальной формуле, учитывающей условия разрушения породы, характеристики взрывчатого вещества, а также требуемую плотность энергетического воздействия на границу формируемого откоса.

$$d_0 = D_{\text{скв}} \cdot [654154 \cdot f^{0.6175} / ((\gamma_0 - 1) \cdot \gamma_{\text{вв}} \cdot U_{\text{уд}})]^{(1 / 2k)} \cdot \sqrt{(\gamma_{\text{вв}} / 373)} \quad (2.1)$$

где $D_{\text{скв}}$ - диаметр контурной скважины, м;

f - коэффициент крепости породы по шкале Протоdjяконова М.М;

γ_0 , $\gamma_{\text{вв}}$ и $U_{\text{уд}}$ - параметры, относящиеся к ВВ контурного заряда [1].

2.2 Механизмы взрывного разрушения

Процессы взрывного разрушения, оказывающие влияние на устойчивость откоса, условно делятся по зонам действия на ближнюю и дальнюю. В пределах ближней зоны — на расстоянии менее 50 метров от места детонации — разрушение массива происходит под воздействием нескольких ключевых факторов: ударной волны, возникновения и распространения трещин, смещений пород вследствие газового давления, а также разрывов при растяжении.

Во время детонации в соответствии с рисунком 2.2 взрывчатое вещество, находящееся в скважине, практически мгновенно переходит из квазитвёрдого состояния в состояние сверхнасыщенного газа, обладающего чрезвычайно высокой температурой и давлением. Колонка ВВ высотой порядка 10 метров

исчезает за считанные миллисекунды, увеличиваясь в объёме примерно в 1000 раз. В результате этого в скважине создаётся давление, превышающее 2 ГПа.

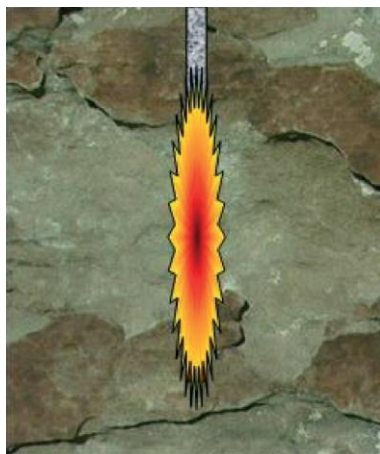


Рисунок 2.2 – Детонация взрывчатого вещества

Это экстремальное давление инициирует мощную ударную волну, распространяющуюся от стенок скважины в окружающий породный массив. Дальнейшее воздействие включает развитие трещин и смещений, образующихся под влиянием высоких напряжений и газодинамического расширения. Эти явления являются основными причинами нарушения целостности пород вблизи контуров откоса и снижения их устойчивости.

Давление, создаваемое первоначальной ударной волной при взрыве, существенно превышает прочностные характеристики породы. В результате этого в пределах радиуса, составляющего 2–3 диаметра заряда, происходит разрушение массива преимущественно за счёт мощного сжатия в соответствии с рисунком 2.3. На этой стадии порода подвергается интенсивному механическому воздействию, сопровождающемуся деформацией и дроблением.



Рисунок 2.3 – Разрушение породы сжатием непосредственно вокруг ВВ

По мере дробления массива и расширения скважины происходит снижение давления внутри неё, и ударная волна переходит в форму упругих сейсмических колебаний. Эти колебания распространяются по массиву со скоростью, соответствующей скорости продольных волн, вызывая радиальное сжатие пород. При этом возникают касательные (окружные) напряжения. Если величина этих напряжений превышает предел прочности породы на растяжение, то в окружающем массиве, как правило в зоне радиусом 20–30 диаметров от скважины, происходит формирование системы трещин, распространяющихся в разных направлениях в соответствии с рисунком 2.4.

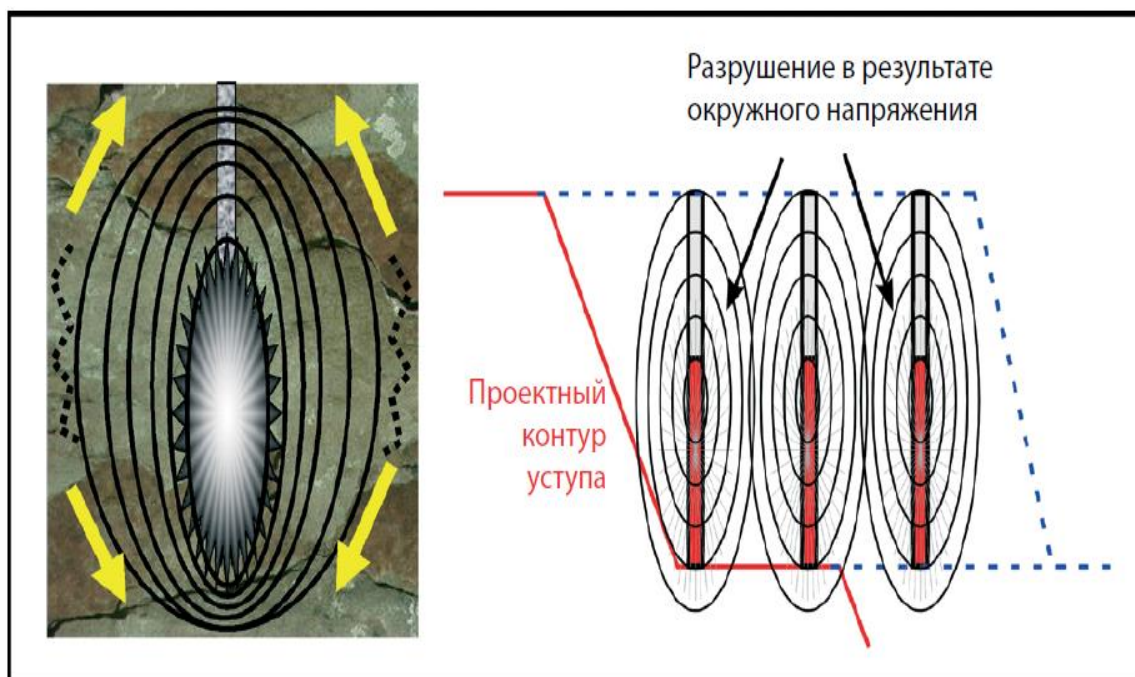


Рисунок 2.4 – Разрушение породы сжатием непосредственно вокруг ВВ

Когда волна деформации достигает границы раздела между породой и пустотой (например, ранее образованной трещиной или откосом), происходит отражение этой волны в виде растягивающей волны. В случае, если возникающее растягивающее напряжение превышает прочностный предел породы на разрыв, происходит её откалывание. Этот процесс растяжения и отслоения приводит к локальному снижению напряжений, вследствие чего последующее распространение сейсмических волн не вызывает значительных разрушений.

Оценка степени воздействия сейсмических волн на откосы может осуществляться путём измерения максимальной скорости вибраций, выражаемой в миллиметрах в секунду (мм/с). Этот показатель позволяет прогнозировать степень сотрясения массива и его устойчивость после проведения взрывных работ.

Максимальная скорость колебаний, способная разрушить породу, зависит от прочности и структуры породного массива. Типичные пороги разрушения:

- при 50–100 мм / с разрушаются рыхлые структуры;
- при 125–500 мм / с разрушаются слабые породы;
- при 375–1000 мм / с разрушаются крепкие неветрелые породы;

Завершающая стадия взрывного разрушения горной породы связана с воздействием продуктов детонации — газов, обладающих высоким давлением. Данный процесс начинается сразу после инициации заряда, однако его динамика значительно уступает по скорости ударной волне и сопровождающим её сейсмическим колебаниям.

На начальном этапе воздействия взрывные газы создают в околоскважинном массиве состояние квазистатического напряжения. Это напряжение может быть достаточным для формирования новых трещин в породе. По мере проникновения газа в существующие или вновь образованные трещины происходит их расширение, что способствует дополнительному дроблению породы. Взаимное пересечение множества растущих трещин формирует зону интенсивного разрушения, радиус которой может достигать 20–30 диаметров скважинного заряда, в зависимости от прочности породы, характеристик ВВ и условий локализации энергии в соответствии с рисунком 2.5.

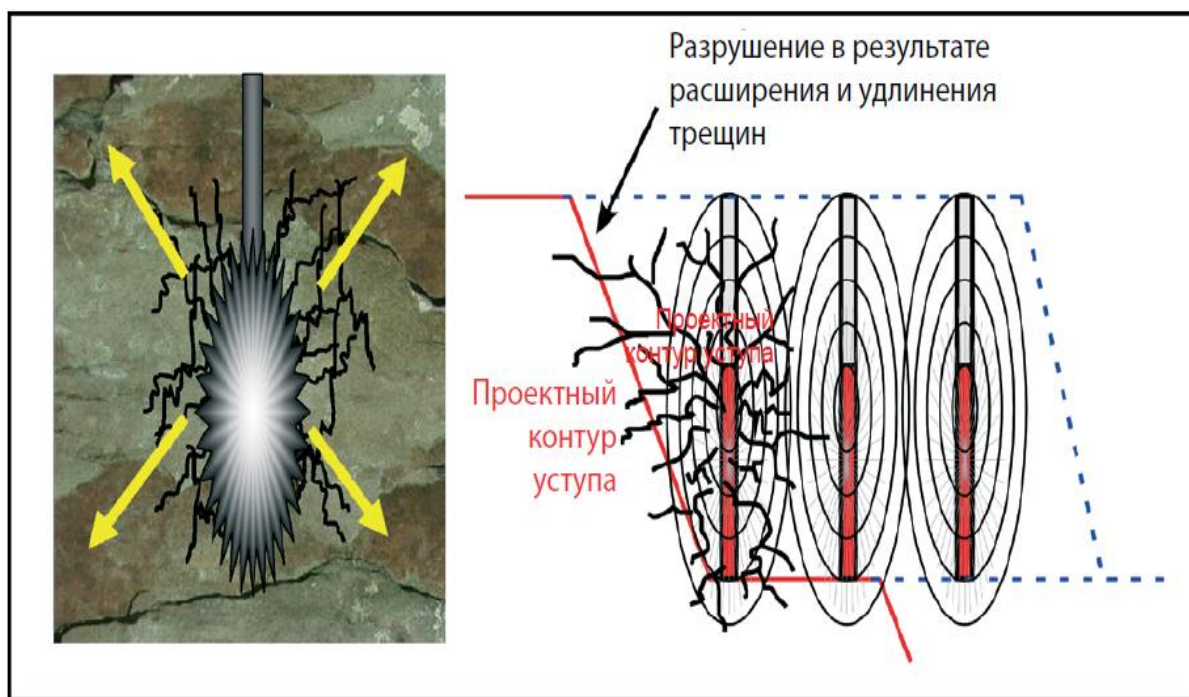


Рисунок 2.5 – Разрушения в результате расширения и удлинения трещин

При корректном применении методов контурного взрывания — таких как формирование предварительных щелей и правильное проектирование сетки бурения — возможно существенно ограничить распространение трещин в нежелательных направлениях и минимизировать повреждение массива за пределами рабочего контура. Схематически показаны основные зоны разрушения, возникающие в результате сжатия (дробление), растяжения (трещинообразование) и радиального растрескивания.

Заключительный этап разрушения породы связан с изгибом и последующим раскалыванием участков массива, вызванным давлением расширяющихся газов. В этот момент газы распространяются по направлениям с наименьшим сопротивлением, что может привести к чрезмерной отбойке материала, если заранее не была организована эффективная разгрузка давления в сторону свободной поверхности в соответствии с рисунком 2.6.

Особую опасность представляют участки, где в откосах уступов залегают ослабленные или неблагоприятно ориентированные тектонические разломы и зоны трещиноватости. В таких случаях давление газов может вызвать вспучивание блоков или даже их выброс за пределы расчетной границы массива в соответствии с рисунком 2.7. Если разгрузка давления недостаточна, происходит неконтролируемое разрушение породного массива, простирающееся за пределы проектной зоны работ в соответствии с рисунком 2.8 [3].



Рисунок 2.6 – Разрушение в ближней зоне взрыва

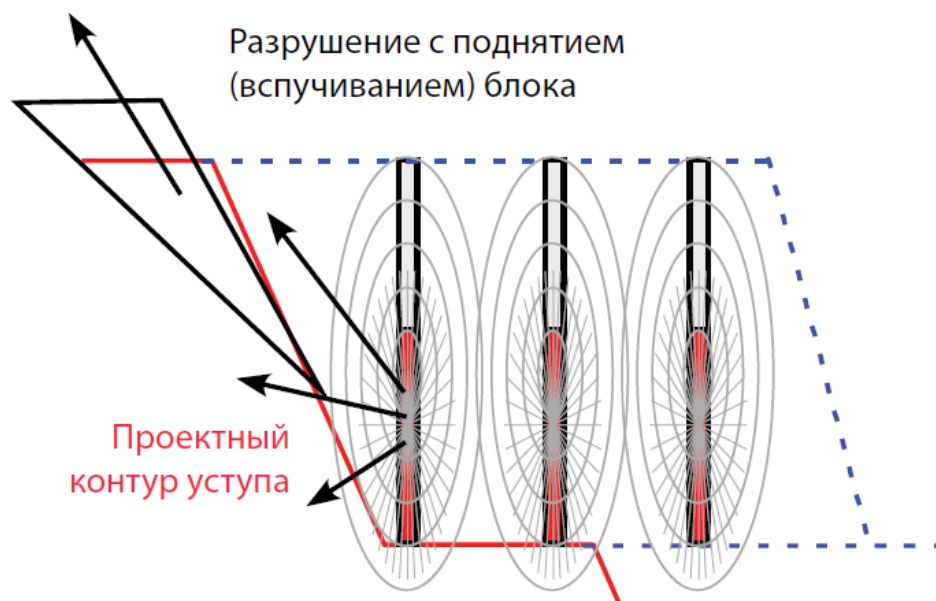


Рисунок 2.7 – Разрушение откоса с поднятием (вспучиванием) блока

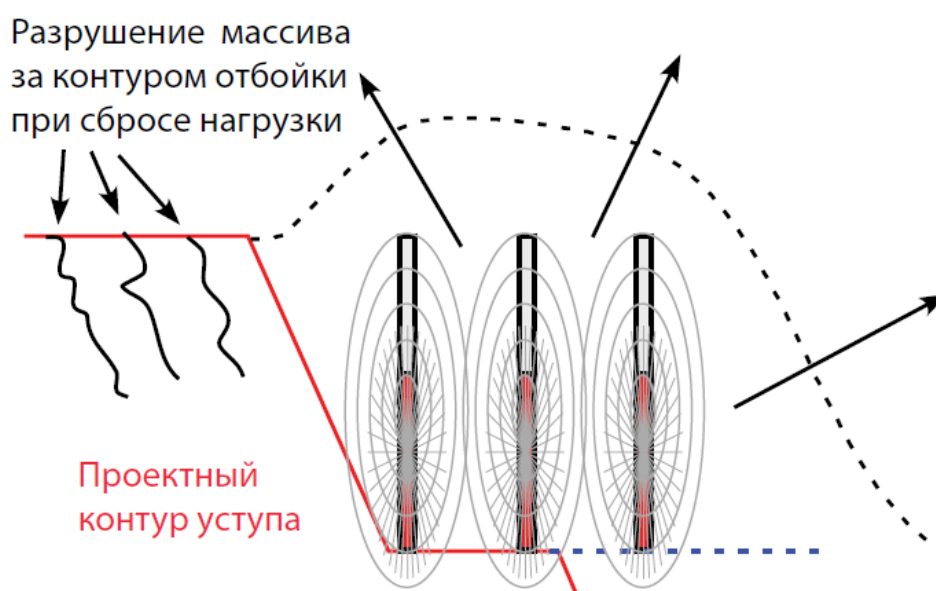


Рисунок 2.8 – Разрушение откоса с поднятием (вспучиванием) блока

2.3 Формирование откосов уступов на предельном контуре карьера

Использование скважин уменьшенного диаметра имеет следующие преимущества: возможность более равномерного распределения взрывчатого вещества по объему взрываемого уступа (что приводит к улучшению качества дробления взорванной горной массы), меньшая интенсивность и продолжительность динамического нагружения окружающего породного

массива (что снижает абсолютные размеры зон разрушения и разупрочнения породы в глубь массива) и не требует изменения типа ВВ и технологии заряжания скважин на блоке. Но самое главное преимущество – это возможность формирования (без применения элементов контурного взрывания) практически вертикальных откосов приграничных уступов при производстве обычных технологических взрывов в рабочей зоне, что позволяет снять проблемы с последующим бурением скважин первого ряда [3].

На горных участках карьера «Актогай» основным типом используемых скважинных зарядов при взрывной подготовке горной массы являются заряды диаметром 203 мм, которые на протяжении длительного времени остаются базовым технологическим решением. В карьере наблюдались проблемы по состоянию откосов карьера, чтобы решить данную проблему было решено провести исследования опытно-промышленных взрывов. В последние годы при проведении контурных взрывов наблюдается устойчивая тенденция к использованию скважин уменьшенного диаметра — 165 мм. Ранее для окончательного формирования откосов уступов также применялись скважины диаметром 203 мм, однако результаты проведённых опытно-промышленных взрывов, выполненных при участии специалистов ТОО «KAZ Minerals Aktogay», подтвердили целесообразность перехода на меньший диаметр.

Одной из ключевых причин внедрения скважин меньшего диаметра стало стремление снизить разрушительное воздействие взрыва на сохраняемый массив, включая минимизацию деформаций за контуром и повышение устойчивости откосов. Полученные экспериментальные и опытно-промышленные данные, отражённые в профильной научной литературе, стали основой для разработки и внедрения новых технических подходов к проведению буровзрывных работ, направленных на повышение точности и качества формирования контуров уступов.

Основные технологические параметры контурного взрывания, включающие:

- диаметр контурных зарядов;
- расстояние между соседними скважинами;
- длину верхней незаряжаемой части;
- глубину перебура напрямую зависят от выбранного диаметра скважин и типа применяемого взрывчатого вещества;

В примере на +290 горизонте 2 стадии карьера наблюдается плохое качество взрыва приконтурного блока, которое способствовала к недостижению откоса к проектным параметрам. Также было сделано сканирование откоса карьера, данные которых показало, что разница между проектом и фактом доходит до 2–3 метров. Ниже представлена фотографий откоса после взрывных работ, до проведения исследования в соответствии с рисунком 2.9.



Рисунок 2.9 – Состояния откоса на 2 стадии карьера, до проведения исследования

Ниже представлена результат съемки со сканера, состояния откоса до проведения исследования в соответствии с рисунком 2.10.

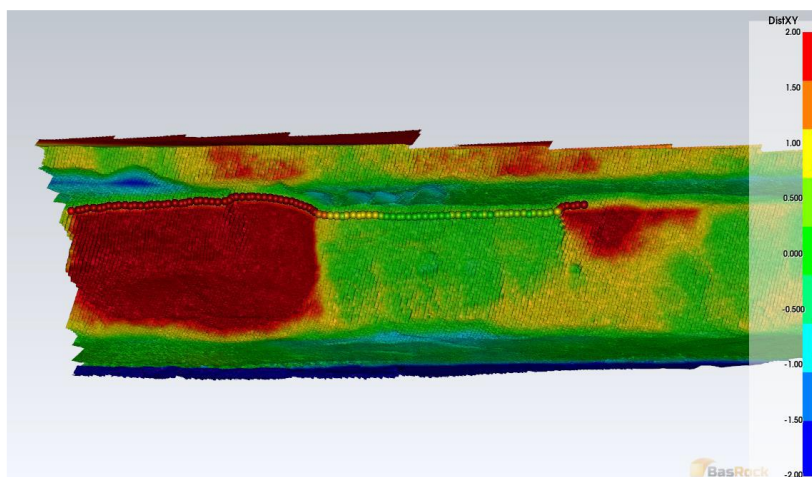


Рисунок 2.10 – Результаты съемки со сканера, состояния откоса до проведения исследования

На месторождения Актогай применяется сенсibilизированное эмульсионное взрывчатое вещество Fortis™ Extra 70 компаний Орика, специально разработано для ведения сложных взрывных работ на карьерах.

Fortis™ Extra 70 применяется для заряжания обводненных скважин, не подходит для реактивных сульфидсодержащих пород. Старая конструкция заряда со временем показало неэффективность, и требовало оптимизаций конструкций заряда, сетки бурения. Ниже представлено старая схема блоков приконтурного блока в соответствии с рисунком 2.11.

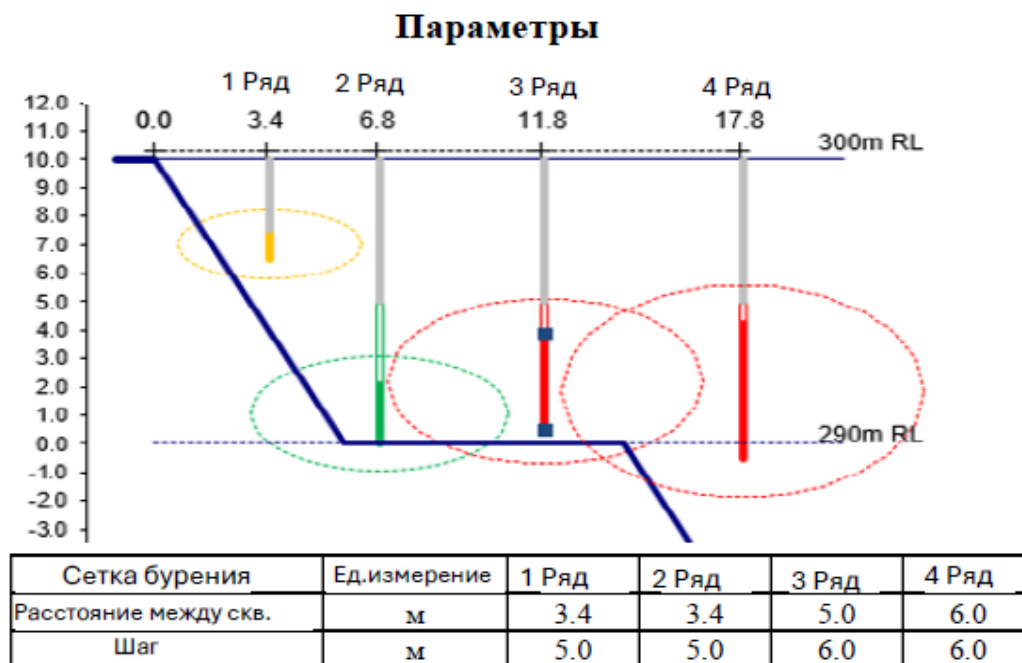


Рисунок 2.11 – Старые параметры сетки бурение и конструкций заряда контурного блока

Отступ коротких скважин от верхней бровки 4,0 м, 2-ряд скважин бурилось до проектной отметки, 3-ряд скважин также бурилось до проектной отметки, диаметр всех скважин 203 мм.

В рамках проводимых исследований было выбрана зона гранодиоритов, в 2 стадии карьера, а также была разработана оптимизированная схема конструкции контурного заряда, а также усовершенствованная сетка бурения, направленная на снижение сейсмического и газодинамического воздействия на откосы. Данные решения позволили добиться улучшения геометрии откосов и увеличить эффективность технологического процесса.

Краткий обзор внедренных изменений и технических параметров представлен в соответствии с рисунком 2.12:

- изменить отступ коротких скважин от верхней бровки на 4,0 м;
- не добурить 1-ряд скважин на 0,5 м до проектной отметки;
- не добурить 2-ряд скважин на 1,0 м до проектной отметки;
- изменить диаметр скважин на 165мм 1 и 2-ряда скважин;
- изменить сетку скважин;

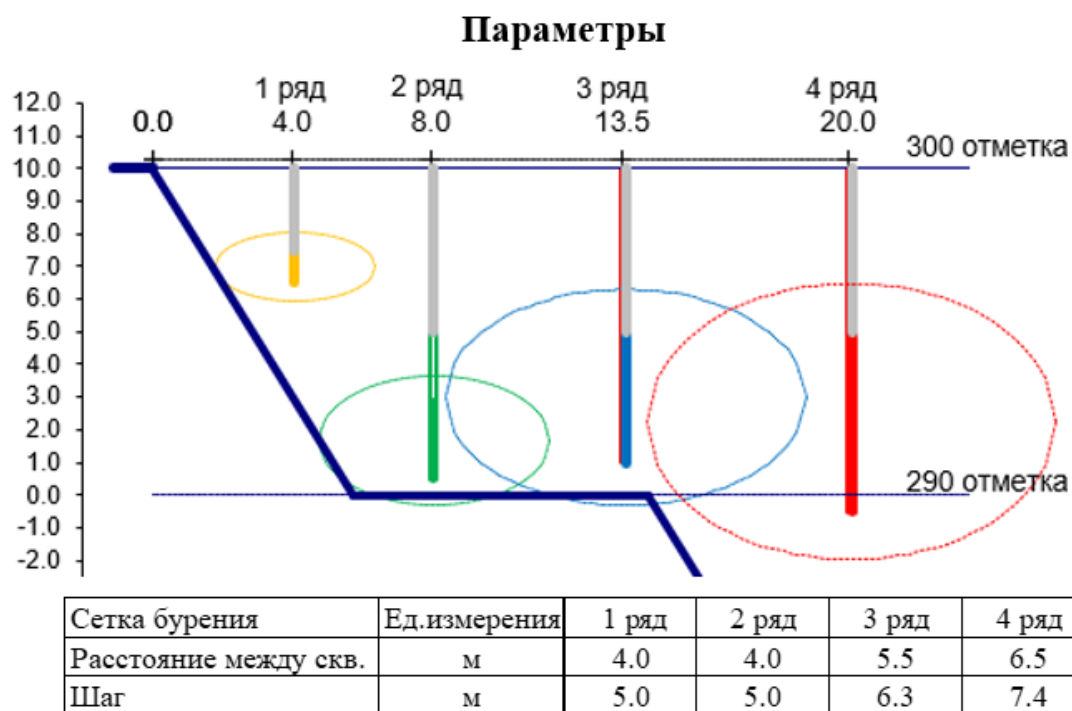


Рисунок 2.12 – Параметры сетки бурение и конструкций заряда контурного блока

Конструкция заряда:

- 1 ряд - 26 кг взрывчатого вещества;
- 2 ряд - 59 кг;
- 3 ряд - 155 кг;
- 4 ряд – 214 кг;

Скважины, применяемые при щадящем взрывании, располагались по шахматной схеме и были взорваны на свободную поверхность. Точка инициирования заряда выбиралась в углу, в месте наибольшего ослабления взрывной волны, что позволяло снизить динамическое воздействие на массив породы и улучшить качество разрушения в соответствии с рисунком 2.13.



Рисунок 2.13 – Точка инициаций

Для проведения испытаний был выбран блок с номером 1290001, 1290002, 1290003, 1290004, 1290005 расположенный на горизонте +290 м, на уступе высотой 10 метров. После проведения взрыва контурных блоков и последующей отработки данного участка была сделана фотография откоса в соответствии с рисунком 2.14. Результаты взрывов оказались положительными: верхняя бровка уступа сохранилась без подбоя, что свидетельствует о качественном контроле разрушения горной массы.

Далее была выполнена заоткоска уступа с приведением его к проектным отметкам, после чего сделана повторная фотография в соответствии с рисунком 2.15. Кроме того, была проведена маркшейдерская съёмка верхних и нижних бровок уступа.



Рисунок 2.14 – Состояния откоса после отработки контурного блока 1290001



Рисунок 2.15 – Состояния откоса после заоткоски уступа контурного блока 1290001

Далее была выполнена заоткоска уступа с приведением его к проектным отметкам 1290002 блока, после чего сделана повторная фотография в соответствии с рисунком 2.16. Кроме того, была проведена маркшейдерская съёмка верхних и нижних бровок уступа.



Рисунок 2.16 – Состояния откоса после заоткоски уступа контурного блока 1290002

Далее была выполнена заоткоска уступа с приведением его к проектным отметкам 1290003 блока, после чего сделана повторная фотография в соответствии с рисунком 2.17. Кроме того, была проведена маркшейдерская съёмка верхних и нижних бровок уступа.



Рисунок 2.17 – Состояния откоса после заоткоски уступа контурного блока 1290003

Далее была выполнена заоткоска уступа с приведением его к проектным отметкам 1290004 блока, после чего сделана повторная фотография в соответствии с рисунком 2.18. Кроме того, была проведена маркшейдерская съёмка верхних и нижних бровок уступа.



Рисунок 2.18 – Состояния откоса после заоткоски уступа
контурного блока 1290004

Далее была выполнена заоткоска уступа с приведением его к проектным отметкам 1290005 блока, после чего сделана повторная фотография в соответствии с рисунком 2.19. Кроме того, была проведена маркшейдерская съёмка верхних и нижних бровок уступа.



Рисунок 2.19 – Состояния откоса после заоткоски уступа
контурного блока 1290005

Анализ данных съёмок показал, что отклонение от проектных отметок не превышало 1 метра, что подтверждает высокое качество выполнения взрывных работ и соответствие фактического положения откоса проектным параметрам в соответствии с рисунком 2.20.

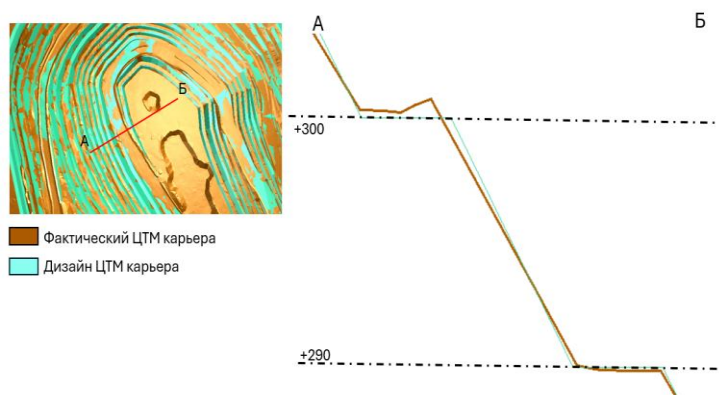


Рисунок 2.20 – Разрез между фактической ЦТМ и дизайном карьера

При проектировании буровых скважин был предусмотрен ряд скважин, расположенных выше проектной бровки уступа. Для уменьшения риска повреждений данный ряд был смещён по вертикали относительно бровки как показано на разрезе в соответствии с рисунком 2.21, нижняя бровка и берма были эффективно взорваны, что свидетельствует о правильности выбранной схемы бурения и постановки зарядов.

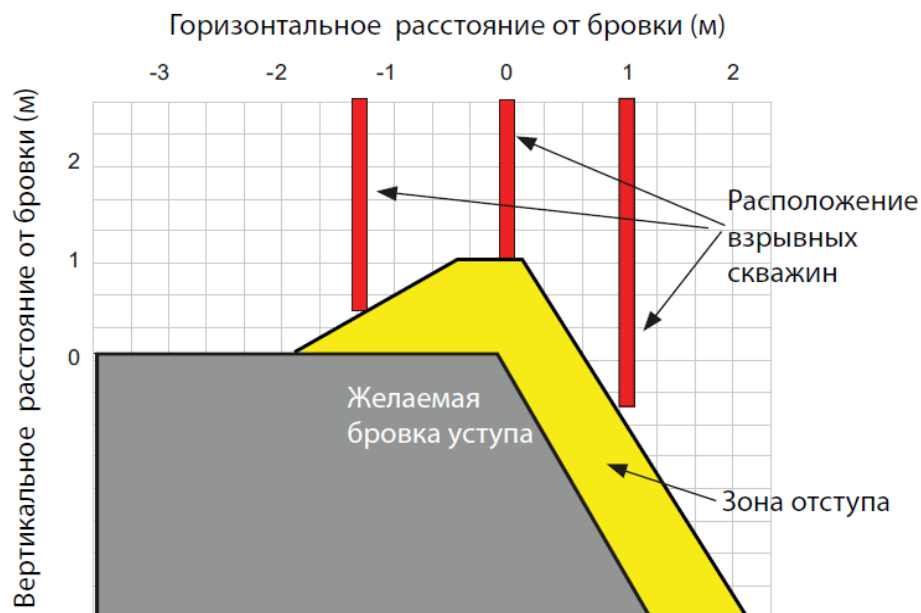


Рисунок 2.21 – Смещение места бурения для защиты проектного контура уступа

По результатам испытаний данных блоков указанные параметры были утверждены в качестве паспортных. Следует отметить, что с продвижением вскрытия новых горизонтов геологические условия и физико-механические свойства пород могут изменяться. В связи с этим работы по испытанию контурных блоков будут продолжены на нижних горизонтах по мере дальнейшей отработки карьера.

3 Анализ и область применения программного обеспечения для определения гранулометрического состава взорванных горных пород в карьерах по добыче меди

3.1 Принцип работы и возможности программного обеспечения *ShovelMetrics*TM для определения гранулометрического состава взорванных горных пород на месторождении Актогай

На сегодняшний день в мировой практике применяются различные технологии и системы для анализа гранулометрического состава взорванных горных пород, основанные на оптических, лазерных и цифровых методах. Основные из них:

WipFrag (Канада) – одна из наиболее распространённых программных систем обработки изображений для анализа фракционного состава. Работает с фото- и видеоматериалами, полученными с беспилотных летательных аппаратов, камер или смартфонов. Используется в ряде горнодобывающих предприятий, однако требует ручной калибровки и не всегда обеспечивает высокую точность при сложных световых условиях.

Split-Desktop и Split-FX (США) – системы анализа фрагментации, применяемые в карьерах и на обогатительных фабриках. Позволяют анализировать как статические изображения, так и видеопоток. Хорошо подходят для оценки крупности материала на конвейерах и в зонах дробления.

FragScan – система, основанная на использовании высокоточных лазерных сканеров и программного обеспечения для 3D-реконструкции. Отличается высокой точностью, но требует значительных затрат на оборудование и сложна в эксплуатации.

Wencomine Fragmentation Analysis – интегрированная система в составе решений Wenco для управления горными работами. Позволяет проводить анализ фрагментации с экскаваторов и бортов самосвалов, обеспечивая высокую оперативность, но требует полной цифровизации производственного цикла.

Преимущества системы *ShovelMetrics*TM, разработанная компанией Motion Metrics, представляет собой интеллектуальное технологическое решение, предназначенное для повышения эффективности и безопасности эксплуатации экскавационного оборудования в условиях открытых горных работ. За период более чем семнадцати лет применения данная система зарекомендовала себя как надежный и эффективный инструмент, получивший широкое распространение на более чем 100 горнодобывающих предприятиях по всему миру, включая все шесть обитаемых континентов.

Основными преимуществами системы являются высокая точность измерений, стабильность функционирования в различных горно-геологических условиях и способность к интеграции с другими компонентами

цифровой инфраструктуры горнодобывающего предприятия. Использование *ShovelMetrics*TM позволяет оптимизировать технологические процессы добычи, снижать вероятность возникновения незапланированных простоев оборудования, предотвращать повреждение первичных дробильных установок, а также способствует повышению общего уровня промышленной безопасности.

Особое значение *ShovelMetrics*TM приобретает в контексте оптимизации буровзрывных работ (БВР). Система осуществляет непрерывный мониторинг и анализ гранулометрического состава горной массы в реальном времени, что обеспечивает возможность оперативной оценки качества взрывов. Полученные данные позволяют корректировать параметры БВР с целью снижения удельного расхода взрывчатых веществ при сохранении заданных параметров фрагментации, что оказывает положительное влияние как на эффективность последующих стадий переработки, так и на себестоимость добычи [4].

На Актогайском месторождении система *ShovelMetrics*TM установлена на пяти экскаваторах, включая машины моделей Hitachi EX3600 и EX5600 в соответствии с рисунком 3.1.

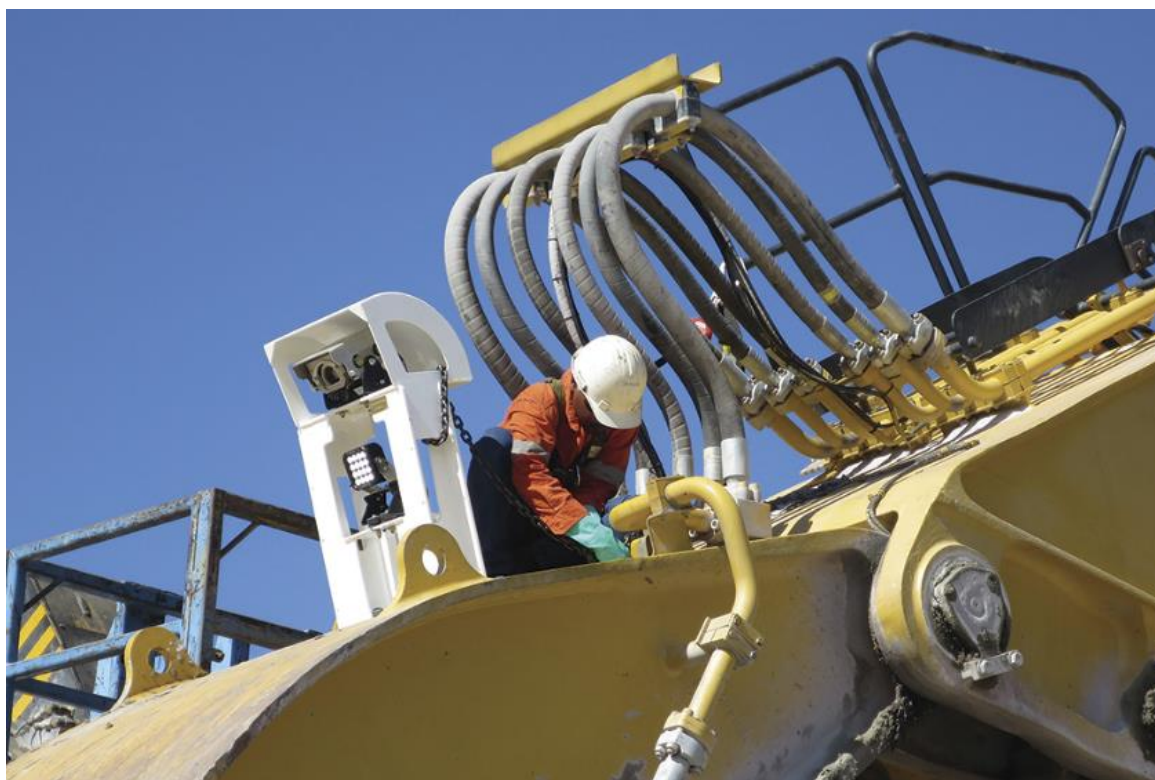


Рисунок 3.1 – Камеры *ShovelMetrics*TM установленный на экскаваторе

Актогайский рудник, принадлежащий компании *KAZ Minerals*, стал первым предприятием на территории стран СНГ, внедрившим

интеллектуальную систему *ShovelMetrics*TM. Основной целью внедрения технологии являлась объективная оценка эффективности буровзрывных работ (БВР) с последующей возможностью оптимизации параметров бурения и взрыва.

С первых месяцев эксплуатации система продемонстрировала высокую информативность и практическую значимость: благодаря сбору и последующему анализу данных на облачной платформе *MMPRO*, использующей методы искусственного интеллекта и машинного обучения, удалось добиться улучшения фрагментации горной массы. Полученные результаты позволили своевременно внести корректировки в параметры БВР, что привело к снижению удельных затрат на взрывные работы при сохранении необходимого уровня качества дробления. Таким образом, применение *ShovelMetrics*TM подтвердило свою эффективность как инструмент принятия обоснованных инженерных решений в контуре оперативного управления горнотехнологическим циклом.

Ключевые возможности системы на Актогае:

- онлайн мониторинг фрагментации взорванных блоков с детализированными отчетами по среднему размеру куска и негабаритам;
- автоматизированный сбор данных, система фиксирует сотни изображений ковша в сутки с каждого экскаватора, при этом частоту съемки можно регулировать в зависимости от требуемой детализации анализа;
- геопривязка данных, благодаря интеграции с системой высокоточного позиционирования появилась возможность привязывать результаты фрагментации к конкретным блокам, что повышает точность геотехнического анализа;
- ИИ обработка, искусственный интеллект анализирует массив данных, экономя время и предоставляя рекомендации по оптимизации параметров бурения с учетом геологических особенностей забоев [7];

Таким образом, *ShovelMetrics*TM не только повысила эффективность БВР, но и стала важным инструментом для адаптивного управления горными работами на предприятии.

3.2 Методика проведения анализа гранулометрического состава взорванных горных пород

Для анализа фрагментации горной массы на карьере Актогай применяется система *Motion Metrics*TM, в частности, технология *ShovelCam*. Эта система основана на компьютерном зрении и установлена на экскаваторе, фиксируя изображения кусков руды в ковше при каждом цикле загрузки.

Этапы сбора данных:

- камера, установленная на ковше экскаватора, делает серию фотографий

загружаемого материала;

- полученные изображения автоматически обрабатываются встроенным ПО Motion Metrics;

- система распознаёт и сегментирует отдельные фрагменты на изображении, измеряет их размеры, и сохраняет данные о распределении по гранулометрическому составу;

- данные передаются в централизованную базу для дальнейшего анализа (через сеть или по Wi-Fi);

Предобработка данных:

- исключаются размытые и некачественные кадры;

- применяется алгоритм удаления "псевдочастиц" (ошибочно определённых фрагментов);

- результаты проверяются специалистами на наличие систематических ошибок;

Для оценки эффективности дробления и оптимизации буровзрывных работ используются следующие ключевые критерии представлен в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Общие критерий и обоснование

Критерий	Обоснование
P80 – размер фрагмента, при котором 80% массы меньше	Основной показатель, используемый для оценки пригодности материала к погрузке и дальнейшему дроблению
Процент крупных (>1000 мм)	Показывает долю негабаритных кусков, требующих дополнительного дробления

Получаемые с помощью системы *ShovelMetrics*TM показатели позволяют не только производить оценку текущего состояния фрагментации горной массы, но и проводить анализ взаимосвязи между параметрами буровзрывных работ и гранулометрическим составом извлекаемой породы. Такой подход обеспечивает более глубокое понимание эффективности применяемых технологических решений и открывает возможности для их дальнейшей оптимизации.

Одним из ключевых преимуществ использования технологий *Motion Metrics* является способность оперативно реагировать на отклонения в качестве взрывных работ. В частности, при выявлении повышенного содержания крупных фракций в отбитой массе становится возможным своевременное внесение корректировок в параметры бурения и взрыва. Это способствует повышению дробимости породы, снижению энергетической и механической нагрузки на оборудование первичного дробления, а также увеличению общего ресурса дробильно-сортировочного комплекса.

3.3 Результаты анализа гранулометрического состава в карьере Актогай

В рамках проведенного исследования на карьере Актогай была выполнена геостатистическая интерпретация данных, полученных с помощью системы *ShovelMetrics*TM компании *Motion Metrics*, с целью выявления пространственной неоднородности качества дробления горной массы. Основная задача заключалась в локализации зон с наибольшими отклонениями фрагментации от проектных параметров, в частности по показателю P80 и доле негабаритных фракций.

Анализ проводился поэтапно и включал следующие стадии:

- привязка данных по фрагментации к координатам буровых блоков;
- использовалась пространственная информация, полученная из геоинформационных систем (ГИС) предприятия или планов бурения, что обеспечивало точную географическую локализацию каждого взрыва;
- сравнительный анализ фактических показателей фрагментации (в первую очередь P80 и содержание негабаритных фракций) с проектными или рекомендованными нормативами. Это позволяло количественно оценить отклонения от технологических требований и определить зоны с наибольшими нарушениями;

На основе результатов интерполяции данных были построены пространственные карты распределения фрагментации, отображающие варьирование показателей P80 и доли негабарита в пределах исследуемых блоков. Эти карты позволили визуализировать ключевые зоны, характеризующиеся:

- превышением проектного значения P80, что свидетельствует о недостаточной степени дробления;
- увеличенной долей негабаритных фракций, создающих риск перегрузки и отказов на стадиях транспортировки и первичного дробления;
- локальными участками с удовлетворительной или даже улучшенной фрагментацией, пригодными для анализа в качестве эталонных зон при корректировке параметров БВР;

Полученные результаты стали основой для выработки рекомендаций по оптимизации параметров буровзрывных работ, в том числе по регулированию сетки бурения, глубины скважин, типа и количества применяемых ВВ, а также временных задержек инициирования.

На ряде участков карьера, в частности в стадии 4, блок 4420220, наблюдается стабильно высокий уровень содержания негабаритных фракций до 18%, а также повышенное значение показателя P80, что указывает на ухудшение качества дробления.

Предположительно, данная ситуация обусловлена рядом факторов, среди которых основными являются:

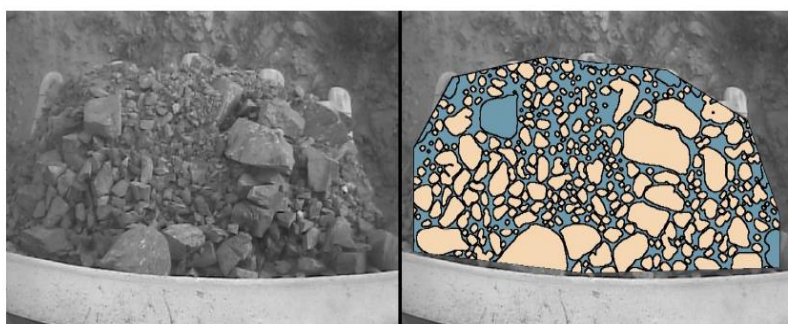
- некорректный выбор параметров короткозамедленного взрывания, в том числе недостаточное значение скорости замедления (мс/м), приводящее к неравномерному распределению энергии взрыва;

- обводнённость скважин, способная снижать эффективность разрушения горной массы за счёт поглощения энергии и ухудшения условий детонации;

Для подтверждения данных были проанализированы фотоснимки забоев, полученные системой *ShovelMetrics™*, один из которых представлен на рисунке 3.2. Согласно результатам измерений, максимальный размер отдельного куска породы составил 177,1 см, что подтверждает наличие значительного количества негабарита и необходимость корректировки параметров буровзрывных работ на данном участке.

2. KAL EX204 | 07/11 @ 06:19

Percent Passing	Value (cm)
P 100	66.0
P 80	31.0
P 50	8.7
P 20	0.4



3. KAL EX204 | 07/11 @ 23:43

Percent Passing	Value (cm)
P 100	177.1
P 80	151.3
P 50	94.3
P 20	14.3

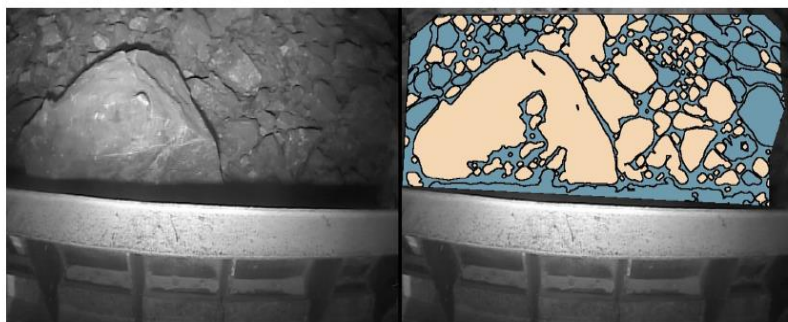


Рисунок 3.2 – Плохое качество взрыва с негабаритной фракцией

В качестве меры по устранению выявленных отклонений и улучшению качества фрагментации горной массы было предложено изменение конструкции зарядов производственных блоков с однородного сплошного на рассредоточенные инертным материалом.

Данное решение направлено на обеспечение более равномерного распределения энергии взрыва по массиву, снижение взаимного экранирования зарядов и повышение эффективности разрушения породы. Ожидаемый эффект от корректировки параметров заключается в уменьшении

доли негабаритных фракций, снижении значения P80, а также в снижении нагрузки на дробильно-сортировочное оборудование.

3.4 Решение проблемы гранулометрического состава взорванных горных пород, изменение конструкции скважинных зарядов

При анализе взрывных работ системой *ShovelMetrics*TM показало, что основной негабарит выходит из верхней части забоя. На руднике Актогай используется система однородного сплошного конструкции скважинных зарядов, тем самым данный вид конструкций не показывает эффективность.

В качестве меры по устранению выявленных отклонений и улучшению качества фрагментации горной массы было предложено изменение конструкции зарядов производственных блоков с однородного сплошного на рассредоточенные инертным материалом.

Данный вид конструкции более равномерно распределяет энергию по массиву, при использовании рассредоточенных (или распределённых) зарядов энергия взрыва передаётся породе в несколько точек по длине скважины, а не в одной концентрированной зоне. Это позволяет уменьшить потери энергии и повысить полноту разрушения породы.

Снижение эффекта экранирования зарядов, когда заряды размещаются ближе друг к другу или взрываются с минимальной задержкой, может возникать эффект экранирования — часть энергии одного заряда гасится соседним. При рассредоточении зарядов и оптимальном выборе задержек этот эффект минимизируется, благодаря чему увеличивается зона эффективного разрушения.

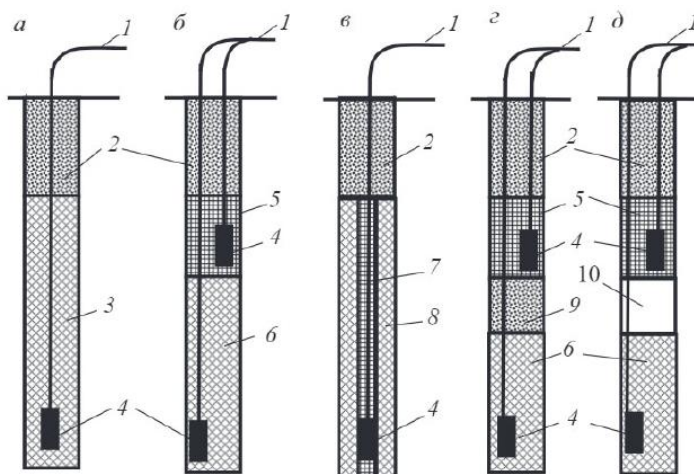
Снижение уровня остаточных негабаритных фракций, рассредоточенные заряды обеспечивают более однородную фрагментацию за счёт последовательного и направленного разрушения массива, что снижает образование крупных негабаритных кусков, затрудняющих последующую транспортировку и переработку.

При проведении взрывных работ конструкции скважинных зарядов применяют в зависимости от конкретных условий. Наиболее простым решением является использование сплошных зарядов ВВ. В состав однородного сплошного заряда входит взрывчатое вещество одной марки и промежуточный детонатор в соответствии с рисунком 3.3а. Комбинированные сплошные заряды чаще всего формируются из взрывчатых веществ разных марок и промежуточных детонаторов, устанавливаемых в каждой марке ВВ. Такие заряды формируют в слабообводненных или осушенных скважинах, когда в нижней части заряда используется водоустойчивое ВВ, а сухая часть скважины заряжается неводоустойчивыми ВВ в соответствии с рисунком 3.3б. Иногда комбинированные сплошные заряды формируются по схеме «цилиндр в цилиндре». В этом случае более мощное ВВ заряжают в

окружении менее мощного ВВ. Внутренний заряд выполняет функцию линейного инициатора ВВ, расположенного вокруг него в соответствии с рисунком 3.3в. Последние две конструкции экономически более выгодны. В то же время замена части заряда ВВ на менее мощное не снижает эффективности взрыва. При использовании смеситель-но-зарядных машин формирование зарядов таких конструкций не вызывает особых затруднений в организации труда взрывников.

Рассредоточенные заряды ВВ по высоте делятся на верхнюю и нижнюю части в соотношении 1:2, а пространство между ними заполняется либо инертным материалом - буровой мелочью, пено-полистиролом или твердеющим пеногелем в соответствии с рисунком 3.3г, либо остается свободным. Тогда между верхней и нижней частями заряда создается воздушный промежуток величиной 0,6–0,8 от длины верхней части заряда в соответствии с рисунком 3.3д. Формирование рассредоточенных зарядов ВВ с воздушным промежутком в сухих, слабообводненных и осушенных скважинах осуществляется при помощи скважинных затворов различных конструкций.

Рассредоточенный заряд по сравнению со сплошным позволяет при той же массе заряда увеличить высоту зоны регулируемого дробления, снизить величину пикового давления продуктов взрыва, что приводит к улучшению дробления массива в зоне регулируемого дробления и уменьшает переизмельчение породы в зоне сжатия [5].



а - однородные сплошные; б - комбинированные; в - «цилиндр в цилиндре»; г - рассредоточенные инертным материалом; д - воздушным промежутком; 1 - проводник начального импульса; 2 - забойка; 3 - заряд ВВ; 4 - промежуточный детонатор; 5 - верхняя часть заряда ВВ; 6 - нижняя часть заряда ВВ; 7 - внутренний цилиндрический заряд ВВ; 8 - внешний цилиндрический заряд ВВ; 9 - внутренний проход; 10 - наружный проход

Рисунок 3.3 –Конструкции скважинных зарядов

Для испытания данной конструкции был взорваны несколько блоков ниже горизонтом, где у нас были негабариты, и после анализа в системе *ShovelMetrics™* мы получили хорошие результаты по фрагментациям, данные можно посмотреть в соответствии с рисунком 3.4.

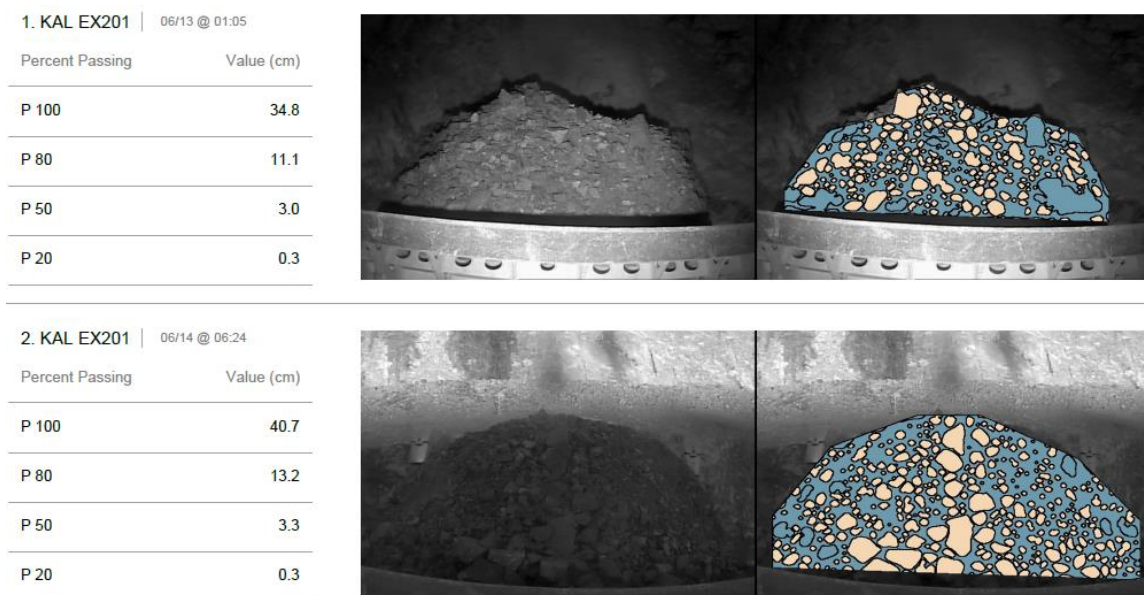


Рисунок 3.4 – Данные с *Shovel Metrics™*

Выход негабарной фракций не было обнаружено, также средний размер фракций P-80 составил 14,1 см, максимальный размер куска составил 40,7см, по испытаниям были получены очень хорошие результаты при удельном расходе ВВ на $= 0.85 \text{ кг/м}^3$, в соответствии с рисунком 3.5. Данные были получены от фактически отработанного блока онлайн.

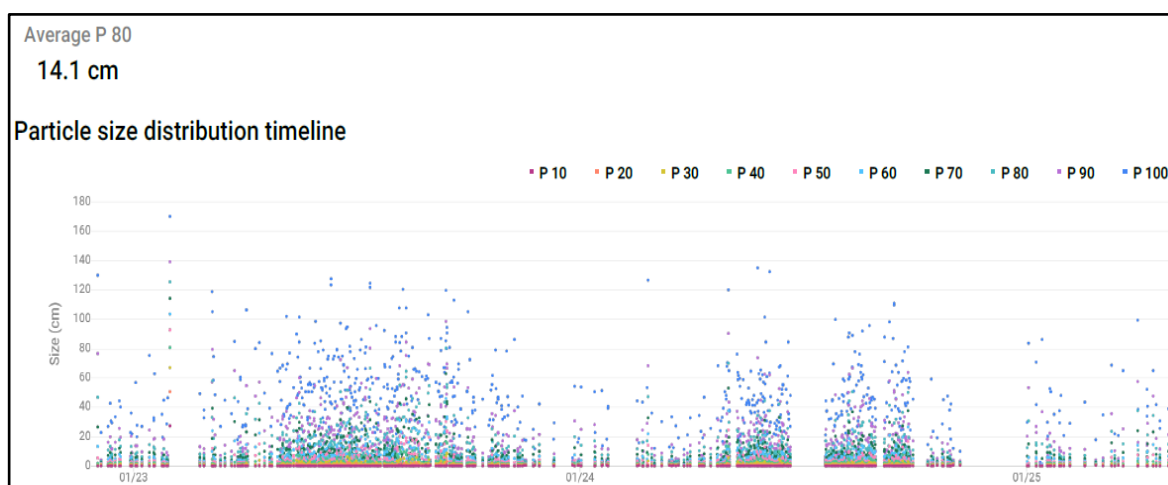


Рисунок 3.5 – Данные с *Shovel Metrics™*

3.5 Обоснование экономических преимуществ, достигнутых в результате применения программы

В результате проведённых испытаний зафиксировано значительное улучшение показателей: доля негабаритных кусков, ранее составлявшая около 3% от общего объёма добычи, была полностью устранена. Это позволило добиться полной экономии затрат на переработку негабарита и существенно сократить общие расходы на буровзрывные работы представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Экономический расчет

Наименование	Ед. изм	Кол-ва
Руда добыто за 1 месяц	тонна	7,500,000
Выход негабаритов до испытания 3 %	тонна	225,000
Стоимость перевозки со склада негабаритов до дробилки 0,33 \$/тонна	долларов США	74,250
Стоимость работы бутобоя 0,08 \$/тонна	долларов США	18,000
Экономия в долларах США	долларов США	92,250

При месячном объёме добычи руды в 7,5 млн тонн, до проведения испытаний объём негабаритного материала составлял 3%, или около 225 000 тонн. Учитывая стоимость транспортировки негабарита до дробильной установки (0,33 доллара США за тонну) и затраты на его дробление (0,08 доллара США за тонну), совокупные ежемесячные издержки достигали примерно 92 250 долларов США.

После внедрения улучшенных параметров буровзрывных работ негабарит практически устранён, что позволило исключить соответствующие расходы. Таким образом, ежемесячная экономия составила 92 250 долларов США, а потенциальная годовая — около 1 107 000 долларов США.

Следует учитывать, что приведённые расчёты являются ориентировочными. В процессе разработки месторождения геологические условия могут меняться, особенно при переходе к более глубоким горизонтам, что потенциально может повлиять на эффективность принятых технических решений.

4 Анализ и оценка методов применение систем электронного инициирования для улучшение гранулометрического состава взорванных горных пород

4.1 Функциональные и технические возможности системы электронного инициирования *I-KON*TM

Системы электронного инициирования разработаны с целью точного, управляемого и надежного программирования времени срабатывания скважинных зарядов наземных и подземных взрывов. В Республике Казахстан разрешено применение электронных детонаторов типа ЭДЭЗ, изготавливаемых на заводе Искра (Россия), DAVEYTRONIC (Франция), UNITRON-IC (Израиль), *I-KON*TM (Канада) и другие. Система электронного взрывания в общем виде состоит из управляющего компьютера, согласующего модуля-адаптера, двухпроводной линии связи и электронных детонаторов. В различных системах, приведенных ниже, названия комплектующих приборов могут различаться. При использовании системы электронного взрывания конфигурация последовательности соединения магистральной линии с детонаторами может быть любой. Последовательность инициирования скважинных детонаторов задается взрывником в соответствии с проектом массового взрыва. После монтажа взрывной сети взрывник с помощью управляющего компьютера программирует схему взрывания. Последовательность срабатывания электронных детонаторов задается специальным прибором, который идентифицирует каждый детонатор и подает в него кодированный импульс тока. Электродетонаторы с электронным замедлением (ЭДЭЗ) отличаются от традиционных электрических детонаторов тем, что вместо замедляющего состава в них используется микропроцессор. Они могут быть использованы только со специальной взрывной машинкой [5].

Система оперативного управления и контроль из программируемых электронных детонаторов, устройства логгер для регистрации и программирования детонаторов и взрывной машинки бластер. Устройство логгер считывает и хранит уникальные идентификационные номера детонаторов, требуемое время замедления и используется во время монтажа сети для программирования последовательности замедлений детонаторов от 0 до 15 с, при этом шаг программирования составляет 1 мс бластер выполняет окончательное тестирование системы и инициирование взрыва. Основные преимущества электронных систем инициирования:

- система является идеальным решением по снижению сейсмического воздействия взрыва на окружающую среду;

- появляется возможность увеличения геометрических параметров сетки скважин, что снижает затраты на буровые работы;
- повышается устойчивость откосов уступов и бортов карьеров, обеспечивается компактность развала горных пород;
- улучшается качество дробления пород, благодаря чему достигаются лучшие показатели производительности горнотранспортного оборудования, дробильных установок, снижаются общие затраты на их обслуживание;
- сохраняется геологическая структура рудных тел, обеспечивая тем самым минимальные потери и разубоживание полезных ископаемых;
- повышается уровень безопасности благодаря возможности получения информации о каждом детонаторе до взрыва [5];

Последовательное взрывание отдельных зарядов или групп зарядов относительно предыдущих с миллисекундными интервалами называется короткозамедленным. Короткозамедленное взрывание (КЗВ) позволяет снизить сейсмический эффект взрыва, действие ударной воздушной волны. Обеспечивается более интенсивное и равномерное дробление породы. Этот результат достигается за счет образования дополнительных обнаженных поверхностей в результате смещения породы зарядами предыдущих серий и кинетической энергии соударения кусков породы при взрывании зарядов смежных серий.

Выбор схем КЗВ позволяет управлять перемещением развала горной массы. Интервал замедления и последовательность взрыва зарядов зависят от задач взрыва (дробление или ее перемещение). При этом учитываются свойства пород, схема расположения зарядов и др. При недостаточном интервале замедления порода, отбиваемая в первую очередь, не успевает переместиться до момента взрыва зарядов следующей ступени и отбойка, таким образом, производится в условиях зажима. В случае взрывания с увеличенными интервалами также резко ухудшается качество дробления и возможны массовые отказы вследствие подбоя средств инициирования соседних зарядов.

Одним из наиболее эффективных методов повышения качества дробления горной массы и снижения доли негабаритных фракций является применение короткозамедленного взрывания (КЗВ). Данный способ заключается в последовательной детонации зарядов взрывчатого вещества через строго заданные промежутки времени, измеряемые в миллисекундах на метр.

Принцип действия КЗВ основан на том, что инициирование каждого последующего заряда или группы зарядов происходит в массиве, уже находящемся в напряженном состоянии от действия предыдущих взрывов. Это приводит к более полному и направленному разрушению породы, а также к повышению полезного действия энергии взрыва.

Эффективное управление взрывными работами, направленное на достижение высокого качества дробления горной массы при одновременном снижении негативных последствий (таких как сейсмическое воздействие и воздушные ударные волны), возможно только при рациональном подборе схемы инициирования зарядов и корректном определении временных задержек между их срабатыванием.

Характер разрушения пород во многом определяется режимом взаимодействия зарядов, включающим параметры импульсных нагрузок – их длительность, кратность и интенсивность. Эти параметры в совокупности определяют условия взаимодействия скважинных зарядов при использовании схем короткозамедленного взрывания и оказывают существенное влияние на качество фрагментации и форму образующегося навала [6].

На горнодобывающих предприятиях наиболее широкое применение получил многорядный способ короткозамедленного взрывания. В этой технологии реализуется поэтапная детонация зарядов с различными временными задержками как между рядами, так и между скважинами в одном ряду.

Поскважинное инициирование зарядов осуществляется с применением неэлектрических или электронных систем, интегрированных в поверхность взрывной сети. Такие системы работают на основе специализированных схем монтажа, обеспечивающих точную последовательность и выдержку времени между подрывами [6].

Ключевым условием повышения эффективности короткозамедленного взрывания является грамотный подбор временного интервала между срабатываниями соседних зарядов. Максимального эффекта фрагментации можно добиться, если последующий заряд инициируется в момент, когда процесс разрушения, вызванный предыдущей детонацией, ещё не завершён. Это позволяет волнам напряжения и ударным импульсам накладываться и усиливать друг друга, что способствует более глубокому разрушению породы и формированию равномерного навала.

Оптимальные задержки обеспечивают равномерное распределение энергии по объёму массива, минимизируя концентрацию остаточных напряжений и обеспечивая синергетическое взаимодействие зарядов. Это улучшает условия разрушения породы, снижает количество крупногабаритных кусков и способствует повышению степени дробления.

Повышение эффективности фрагментации горной массы за счёт корректного подбора временных интервалов замедления между скважинными зарядами не требует внесения изменений в схему бурения, увеличения количества скважин или дополнительного расхода взрывчатых веществ и средств инициирования [7]. Благодаря этому подход сохраняет свою экономическую эффективность и может быть реализован в условиях стандартной производственной практики на горных предприятиях.

Учитывая наличие различных теоретических представлений и моделей, описывающих процессы разрушения горных пород при короткозамедленном взрывании, подбор оптимальных задержек детонации зачастую осуществляется на основе эмпирических данных, полученных при проведении опытно-промышленных подрывов, с последующим анализом крупности полученного кускового материала. Однако в производственных условиях такой подход сопряжён с высокими трудозатратами и финансовыми издержками. В связи с этим, на практике чаще применяются расчётные методики, базирующиеся на теоретических моделях и исходных предположениях. Такой подход позволяет упростить процесс проектирования взрывных работ и существенно сократить временные и материальные ресурсы [9].

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R^1 V} \right) e^{-R^1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R^2 V} \right) e^{-R^2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3.1)$$

где P - гидростатическое давление, Па

$V = v/v_0$ - относительный удельный объем, ед.

$E = e/v_0$ - удельная внутренняя энергия, Дж/м³

$\rho_0 = 1/v_0$ - начальная плотность ВВ, кг/м³

A, B, R_1, R_2, ω - эмпирические константы:

$$A=61.82 \text{ ГПа}$$

$$B=2.36 \text{ ГПа}$$

$$R_1=2.93$$

$$R_2=0.85$$

$$\omega = 0.33$$

$$U_s = C_0 + S U_p \quad (3.2)$$

где C_0 = скорость звука в породе, м/с

U_p = массовая скорость, м/с

S = эмпирическая константа. $S = 1.5$.

Распределение давления, возникающего в горной породе при ударе продуктов детонации о стенку скважины, описывается уравнением Ми-Грюнайзена (3.2):

$$P = P_H + \Gamma \rho_0 (e + eH) \quad (3.3)$$

где P_H - давление Гюгоньо, м/с;

Γ – коэффициент Грюнайзена, ед, $\Gamma = 1.5$;

ρ_0 - плотность горной породы, кг/м³;
 e - удельная внутренняя энергия, Дж/м³.
 eH - удельная внутренняя энергия Гюгонио, Дж/м³.

Для того чтобы моделируемый процесс разрушения отражал реальную картину, необходим учет естественной неоднородности материала модели, что достигается введением вероятностного закона распределения начальных отклонений прочностных свойств в рассматриваемом объеме. В данном случае процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что наиболее полно соответствует реальному процессу разрушения. В качестве функции распределения вероятности используется закон распределения Мотта для фрагментации твердых сред, представленный в виде (3.3):

$$P\{\varepsilon\} = 1 - e^{-C/\gamma (e^\gamma - 1)} \quad (3.4)$$

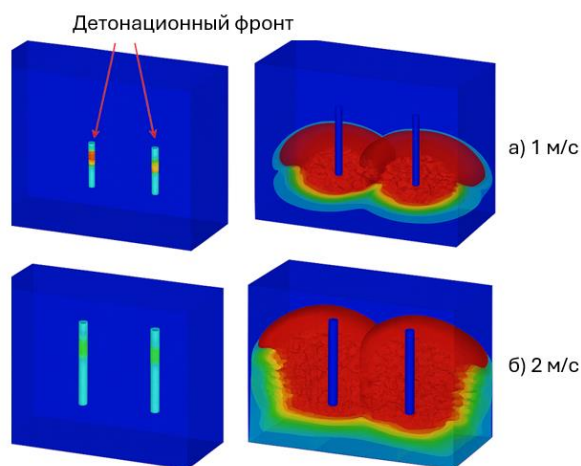
где P – вероятность возникновения трещины;
 ε – деформация, ед;
 γ - дисперсия;
 C – константа материала.

В начальной фазе взрыва, непосредственно в зоне возле забоя скважины, происходит инициирование заряда взрывчатого вещества (ВВ). После срабатывания инициирующего устройства по заряду начинает распространяться детонационная волна, которая движется со скоростью порядка 5000 м/с, относящейся к диапазону гиперзвуковых скоростей.

По мере продвижения фронта детонации происходит стремительное расширение продуктов взрыва, создающее мощное воздействие на стенки скважины. В этот момент на окружающую породу передаётся высокоинтенсивное ударное давление, достигающее десятков ГПа, которое инициирует образование ударной волны. На расстоянии, равном приблизительно 2–3 радиусам заряда, ударная волна постепенно переходит в волну напряжений, распространяющуюся далее по массиву.

По завершении детонационного процесса наблюдается резкое снижение давления, после чего взрывные газы устремляются к устью скважины, при этом оказывая поршневое (квазистатическое) воздействие на породу, усиливающее разрушение массива.

На в соответствии с рисунком 4.1 приведена временная картина описанных процессов на временных отметках 1 и 2 миллисекунды от момента начала взрыва. Для визуализации были применены специальные фильтры, обеспечивающие наглядное отображение продвижения фронта детонации и распределения напряжений в породном массиве.



а) 1 мс; б) 2 мс.

Рисунок 4.1 – Динамика распространения детонационного фронта и напряжений в массиве в моменты времени

На руднике Актогай применялись неэлектрические детонаторы Exel™ MS, представляющие собой серию миллисекундных детонаторов с фиксированными интервалами задержки. Конструкция устройства включает в себя сам детонатор и соединённую с ним трубку-волновод Exel™, обеспечивающую передачу сигнала инициирования. В детонаторах, используемых компанией «Орики Казахстан», реализована технология NPED (Non-Primary Explosive Detonator), исключающая наличие первичных взрывчатых веществ, таких как азид свинца. Детонатор выполнен в алюминиевом корпусе и соответствует по мощности устройствам категории №3.

Ударно-волновая трубка Exel™ изготовлена из прочного и устойчивого к износу полимерного материала, выполняющего функцию направленного волновода. Один её конец герметично зафиксирован в корпусе детонатора, тогда как другой закрыт влагозащитным уплотнением, предотвращающим попадание воды и загрязнений.

Как правило, детонаторы Exel™ применяются в комплексе с поверхностными соединительными элементами с замедлением — Exel™ HTD (Connectadet™). В этом случае все скважины оснащаются внутрискважинными детонаторами Exel™ MS с одинаковым значением задержки, а необходимая последовательность взрыва задаётся на поверхности посредством соединительных блоков. Такой подход ограничивает диапазон возможных временных интервалов и, как следствие, снижает потенциал оптимизации взрывных работ. Минимальное эффективно достижимое замедление при использовании данной системы составляет 24 мс/м, что не

всегда позволяет реализовать требуемый уровень контроля процесса фрагментации.

С целью повышения эффективности буровзрывных работ на месторождении Актогай была внедрена электронная система инициирования I-KON™, представленная на в соответствии с рисунком 4.2.



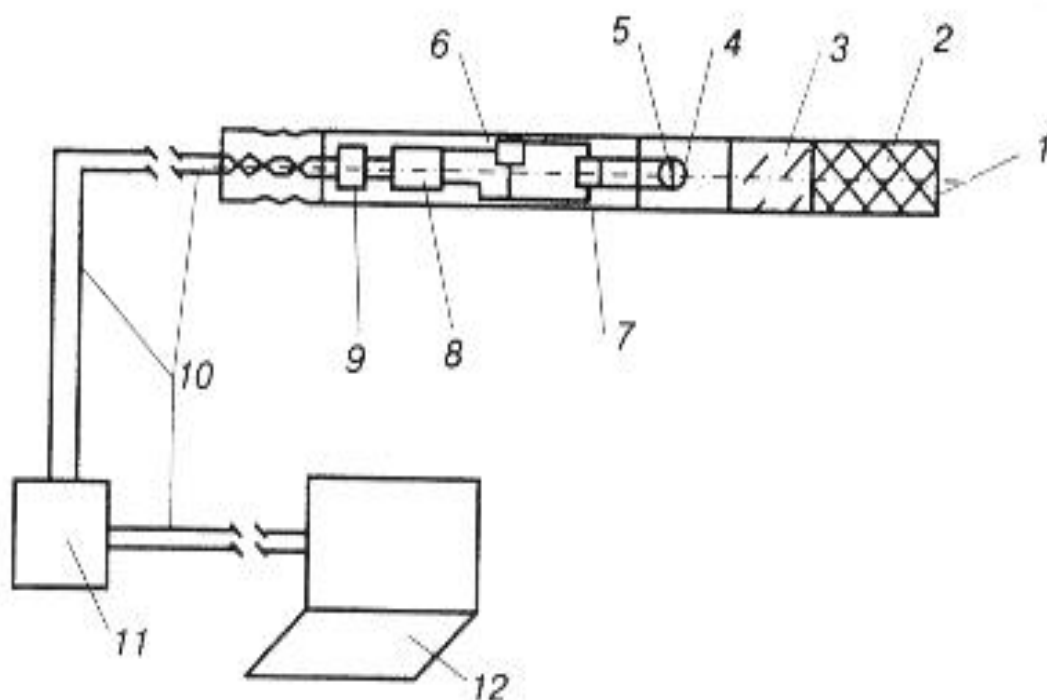
Рисунок 4.2 – Электронный детонатор I-KON™

Практический опыт показал высокую эффективность применения короткозамедленного взрывания при разрушении горных пород. Изначально этот метод внедрялся преимущественно для формирования устойчивого и управляемого обвала массива. Со временем его начали использовать и для снижения сейсмического воздействия на окружающую среду, а затем — с целью улучшения степени дробления породы при ведении буровзрывных работ.

Результаты исследований подтверждают, что сокращение временных задержек между сериями зарядов оказывает положительное влияние на эффективность взрывного процесса [8]. Существенный прогресс был достигнут за счёт отказа от традиционных пиротехнических замедлителей и перехода к использованию микропроцессорных технологий в соответствии с рисунком 4.3. Это стало основой для создания нового типа электродетонаторов с электронным замедлением (ЭДЭЗ), отличающихся возможностью программирования времени срабатывания с минимальным шагом 1 мс и высокой точностью — до 1 мс в диапазоне от 0 до 12 секунд.

В отличие от электродетонаторов с классическим пиротехническим замедлением, в которых воспламенение осуществляется подачей тока от внешнего источника по двухпроводной линии, в ЭДЭЗ импульс инициирования формируется непосредственно внутри детонатора — в результате разряда встроенного конденсатора на нагревательный мостик, вызывающий воспламенение. Такая конструктивная особенность значительно повышает надёжность работы и точность воспламенения.

Дополнительным преимуществом электронной системы инициирования является наличие микропроцессора, позволяющего при производстве присваивать каждому детонатору уникальный идентификационный номер. Это даёт возможность осуществлять выборочное управление каждым устройством в составе взрывной сети, а также позволяет отслеживать их перемещение в случае хищения или несанкционированного доступа [8].



1 – гильза, 2 – заряд бризантного ВВ, 3 – колпачок с зарядом инициирующего ВВ, 4 – воспламенительный состав, 5 – мостик накаливания, 6 – транзисторный ключ, 7 – конденсатор, 8 – микропроцессор, 9 – логическая цепь заряда и управления, 10 – двухпроводная линия связи для передачи импульсных

Рисунок 4.3– Схема КЗВ с использованием ЭДЭЗ

Электронная система инициирования I-KON™ предоставляет широкие возможности по управлению временными параметрами взрыва. Интервалы задержки при внутрискважинном инициировании в данной системе варьируются от 0 до 30 000 миллисекунд и программируются автоматически с использованием специализированного оборудования. Такая гибкость

позволяет задавать произвольное время срабатывания каждого детонатора, обеспечивая точный контроль последовательности взрыва и возможность индивидуальной настройки временной схемы под конкретные геотехнические условия. Это значительно расширяет потенциал оптимизации буровзрывных работ как с точки зрения качества фрагментации, так и в аспектах снижения негативных факторов, сопровождающих взрыв.

4.2 Оптимизация схемы инициирования

Гранулометрический состав взорванной горной массы является важнейшим параметром, характеризующим эффективность буровзрывных работ, поскольку он непосредственно влияет на затраты, связанные с последующим дроблением, транспортировкой и переработкой добытого сырья. Управление процессом фрагментации за счёт оптимизации схемы инициирования и применения точных временных задержек позволяет направленно воздействовать на механизм разрушения породы и обеспечивать необходимую степень её измельчения.

Одним из наиболее результативных решений в данной области является использование электронной системы инициирования *I-KON*TM, обеспечивающей программирование временных интервалов с высокой точностью — вплоть до одной миллисекунды. Такая точность позволяет значительно повысить уровень управляемости процесса взрыва, минимизировать явления наложения и интерференции взрывных волн, а также добиться более равномерного распределения энергии между рядами зарядов.

Полевые и лабораторные исследования показали, что корректный подбор временных задержек и последовательности инициирования способствует снижению доли негабаритных кусков и одновременному уменьшению объёма слишком мелкой фракции. Это особенно важно для повышения эффективности переработки руды на обогатительных предприятиях [9].

Применение короткозамедленного взрывания с заранее рассчитанной и адаптированной схемой инициирования позволяет достичь оптимального баланса между интенсивным разрушением массива и снижением затрат на последующие технологические операции. На практике процесс оптимизации временных параметров включает моделирование различных схем инициирования с использованием специализированного программного обеспечения, а также проведение опытно-промышленных взрывов с последующим анализом полученных данных [10].

Оценка эффективности используемой схемы инициирования осуществляется по следующим основным критериям: распределение размеров кусков, индекс фрагментации, коэффициент эффективности взрыва, а также удельная себестоимость переработки одной тонны руды.

Таким образом, применение электронных систем инициирования, в частности *I-KON*TM, предоставляет широкие возможности для детальной настройки параметров взрыва, что способствует улучшению гранулометрического состава и повышению общей производственной эффективности при ведении горных работ [11].

4.3 Практические результаты и оценка эффективности по данным буровзрывных работ

В целях повышения эффективности буровзрывных работ была проведена оптимизация параметров бурения и конструкции зарядов с учётом геомеханических характеристик разрабатываемого массива. Горные породы в пределах месторождения характеризуются высокой прочностью и абразивностью, что требует особого подхода к выбору режимов бурения и параметров взрывания.

На производственных блоках были предложены уточнённые параметры бурения, направленные на достижение более равномерного разрушения массива и улучшение гранулометрического состава взорванной горной массы. Основной задачей данной оптимизации является обеспечение стабильной подачи руды на первичное дробление и, как следствие, повышение производительности перерабатывающего оборудования.

Результаты опытно-промышленных взрывов с использованием новых параметров будут сопоставлены с текущими данными по ключевым критериям — распределению кусковатости, стабильности обвала, коэффициенту использования энергии взрыва, а также экономическим показателям. При положительном исходе испытаний ожидается снижение совокупных затрат на буровзрывные работы за счёт рационального расхода ВВ и повышения эффективности последующих технологических операций представлен в таблице 4.1, а также экономический расчет в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Параметры блоков для испытания

Наименования	Прежние параметры	Предлагаемые параметры - №1	Предлагаемые параметры - №2	Предлагаемые параметры-№3
Период	фактический	Период 1	Период 2	Период 3
Расстояние между рядами скв.	5,2	5,4	5,6	5,8
Расстояние между скв. в ряду	6,0	6,3	6,6	6,8
Диаметр скв. (мм)	203	203	203	203

продолжение таблицы 4.1				
Наименования	Прежние параметры	Предлагаемые параметры - №1	Предлагаемые параметры - №2	Предлагаемые параметры-№3
Глубина (с учетом перебура) (м)	11	11	11	11
Перебур (м)	1	1	1	1
ВВ (кг) на одну скв.	264	264	264	233
Высота забойки (м)	4,2	4,2	4,2	5
Удельный расход ВВ (кг/м ³)	0,85	0,78	0,71	0,59
Удельный расход ВВ (кг/тонна)	0,32	0,29	0,27	0,22

При существующих параметрах бурения удельный расход взрывчатого вещества (ВВ) составляет 0,85 кг/м³. Это сопровождается образованием так называемой «шапки» взрыва высотой до 3–5 метров и нерациональным расходом энергии, что требует дополнительных затрат при проведении горных работ. В рамках оптимизации были предложены поэтапные изменения параметров заряжания с целью снижения удельного расхода ВВ. Так, на первом этапе предполагается снижение до 0,78 кг/м³, на втором — до 0,71 кг/м³, и на третьем — до 0,59 кг/м³.

Реализация предложенной схемы будет осуществляться с применением электронной системы инициирования *I-KON*TM, что обеспечит высокую точность распределения энергии взрыва во времени и пространстве. Ожидается, что оптимизация приведёт к снижению доли негабаритной фракции и более однородному гранулометрическому составу взорванной массы.

Таблица 4.2 – Экономический расчет

Наименование	Ед.изм	Прежние параметры	Параметры №1	Параметры №2	Параметры №2
Стоимость взрыва за 1скв.	(\$)	217	217	217	217
Плотность породы	(т/м ³)	2,65	2,65	2,65	2,65
Высота уступа (Н)	(м)	10	10	10	10
Расстояние между рядами скв.	(м)	5,2	5,4	5,6	5,8

продолжение таблицы 4.2					
Наименование	Ед.изм	Прежние параметры	Параметры №1	Параметры №2	Параметры №2
Расстояние между скв.в ряду	(м)	6	6.3	6.6	6.2
Тонны	(т)	312	340	370	360
Объем	(м ³)	827	902	979	953
Себестоимость БВР	(\$/м ³)	0,70	0,64	0,59	0,55
Себестоимость БВР	(\$/т)	0,26	0,24	0,22	0,21
Годовой объем взрыва в тоннах	(т)	95,000,000	95,000,000	95,000,000	95,000,000
Расходы на БВР в долларах сша в год	(\$)	24,918,440	22,852,890	21,035,047	19,712,356

Для реализации опытно-промышленных взрывных работ были выбраны производственные блоки, расположенные на различных участках карьера, преимущественно в зонах залегания плотных и прочных пород — диоритов. На приведённых ниже схемах отображены границы и конфигурация контуров блоков, задействованных в ходе испытаний.

Экспериментальные взрывы проводились в течение трёх календарных месяцев. Интервал между сериями составлял около одного месяца, что позволило осуществить пошаговый анализ результатов, а также сравнить эффективность различных параметров взрывания с целью последующей оптимизации.

В рамках испытаний была предложена схема с использованием замедлений в размере 8 мс на метр расстояния между зарядными скважинами. Такая величина задержки была выбрана с целью ускорения общего времени взрыва и повышения степени фрагментации горной массы за счёт улучшенной интерференции ударных волн и более эффективного взаимодействия зарядов между собой.

Применение данной схемы должно было способствовать более полному разрушению массива, улучшению гранулометрического состава, а также снижению объёма негабаритной породы. Результаты каждого этапа оценивались по совокупности показателей, включая визуальный контроль кусковатости, оценку равномерности навала, а также регистрацию сейсмических параметров. 4 стадия западная часть карьера, период №1 в соответствии с рисунком 4.5, 4 стадия восточная часть карьера, период №2 в соответствии с рисунком 4.6, 4 стадия центральная часть карьера, период №3 в соответствии с рисунком 4.7.

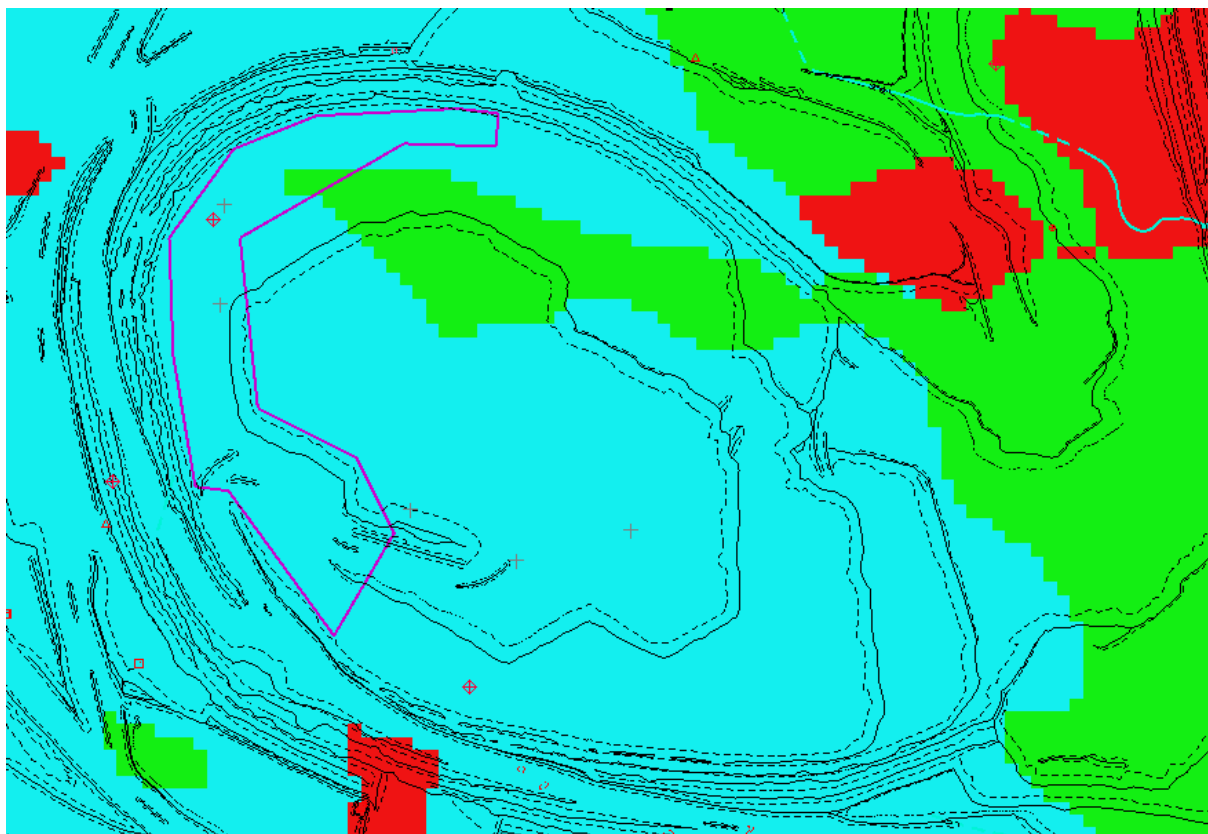


Рисунок 4.5 – Блока выделено фиолетовым 4 стадия
западная часть карьера, период №1

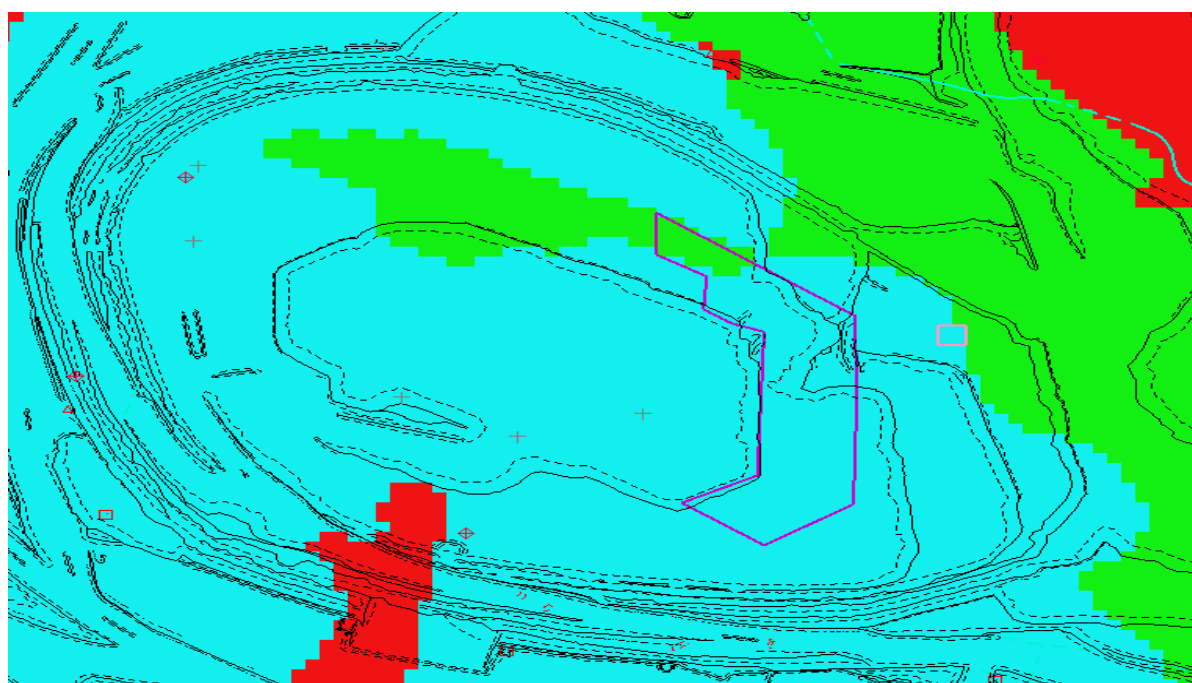


Рисунок 4.6 – Блока выделено фиолетовым 4 стадия
восточная часть карьера, период №2

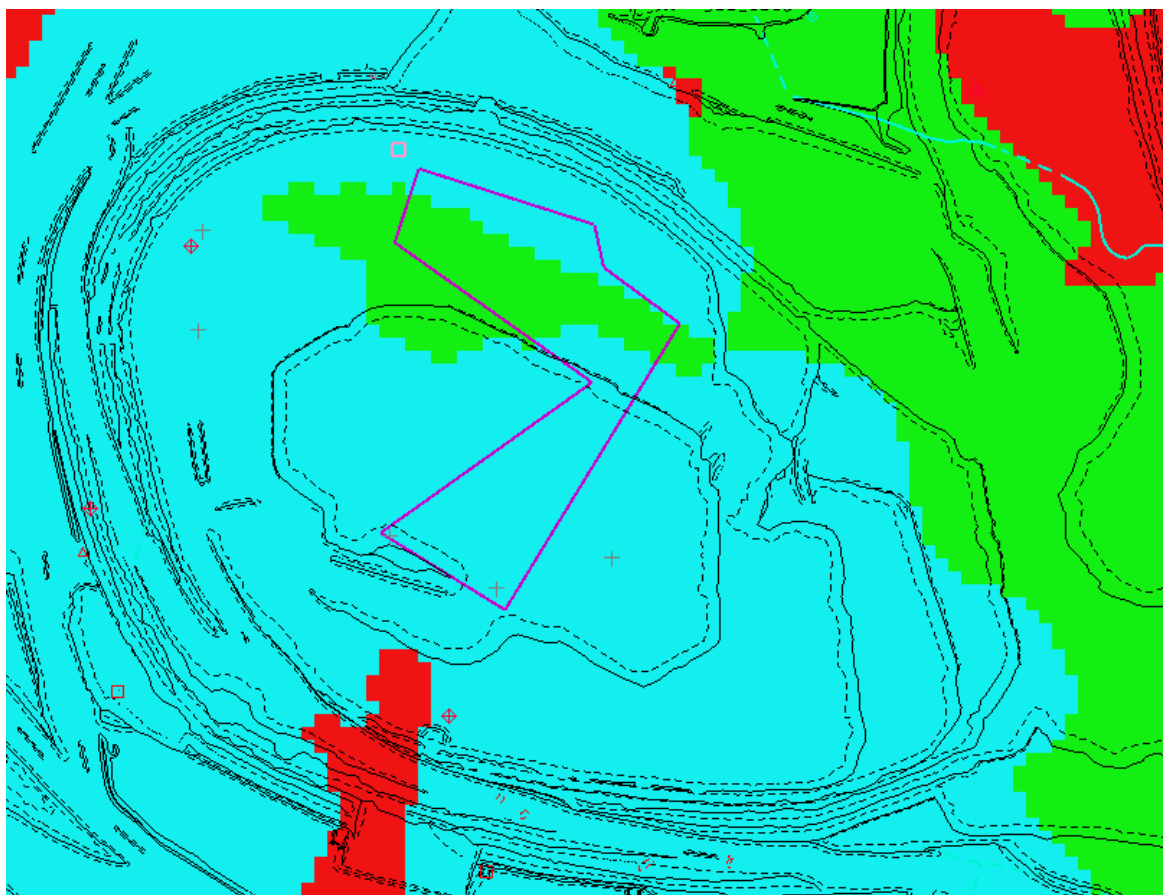


Рисунок 4.7 – Блока выделено фиалетовым 4 стадия
центральная часть карьера, период №3

В ходе проведения опытно-промышленных взрывов в первом периоде результаты показали высокую эффективность подобранных параметров буровзрывных работ. По результатам оценки гранулометрического состава было установлено, что негабарная фракция в отбитой массе отсутствовала.

Средний размер частиц по показателю P80 составил 15,2 см, что соответствует требуемым значениям для эффективной работы дробильно-перерабатывающего оборудования. Максимальный зарегистрированный размер отдельного куска составил 31,9 см. Такие значения свидетельствуют о равномерной фрагментации массива и оптимальном распределении энергии взрыва.

Полученные данные указывают на то, что применённая схема замедлений и параметры зарядов обеспечили качественное разрушение горных пород. На в соответствии с рисунком 4.8 и 4.9 представлены визуализация гранулометрического анализа и характеристика распределения кусковатости, подтверждающие полученные результаты.

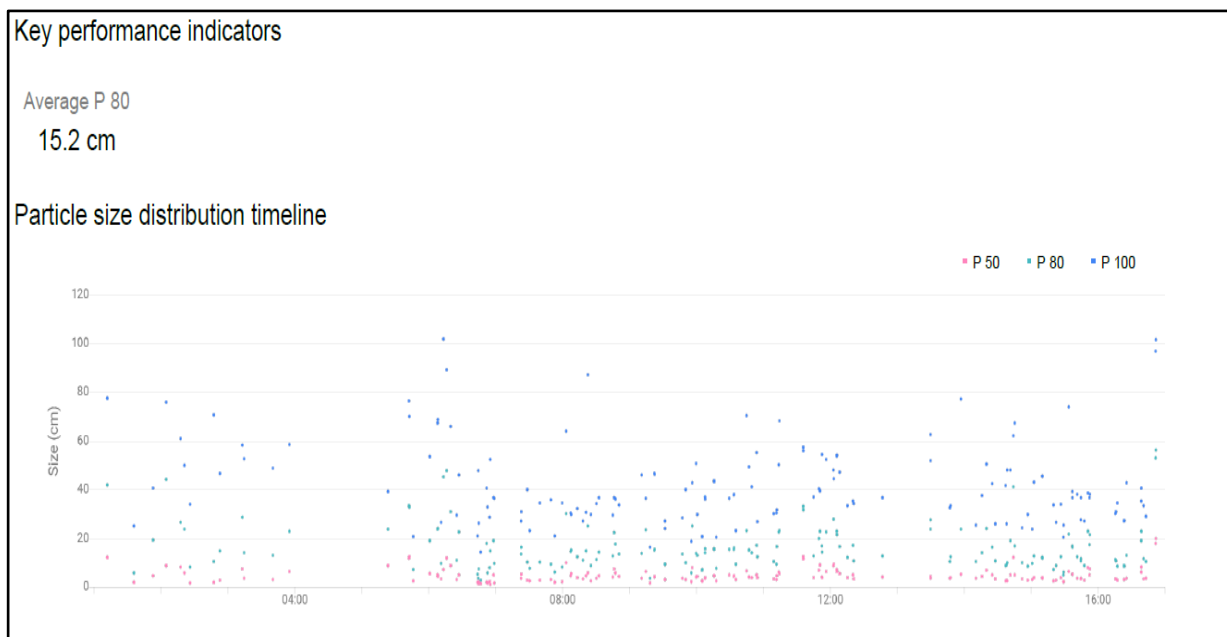


Рисунок 4.8 – Результаты фрагментации, период №1

1. | 01/07 @ 07:00

Percent Passing	Value (cm)
P 100	28.0
P 80	12.2
P 50	5.7
P 20	1.3



2. | 01/09 @ 07:23

Percent Passing	Value (cm)
P 100	31.9
P 80	13.8
P 50	7.0
P 20	2.0

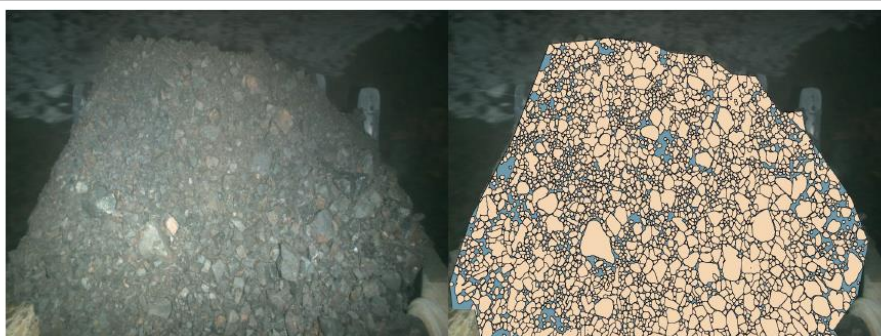


Рисунок 4.9 – Результаты фрагментации, период №1

В период № 2 выход негабарной фракций не было обнаружено, также средний размер фракций P-80 составил 16,2 см, максимальный размер куска составил 62,3см, по испытаниям были получены хорошие результаты, в соответствии с рисунком 4.10 и 4.11.

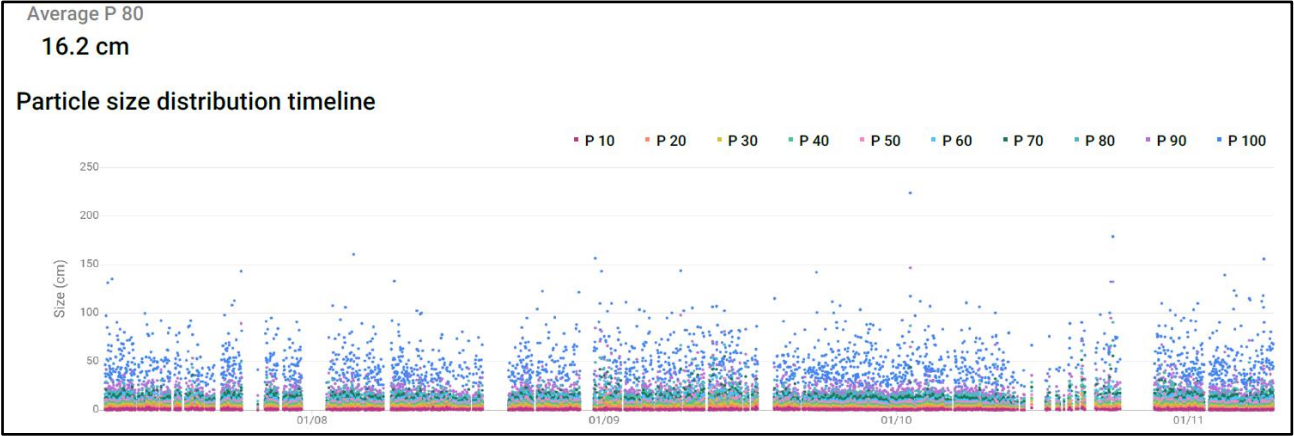


Рисунок 4.10 – Результаты фрагментации, период №2

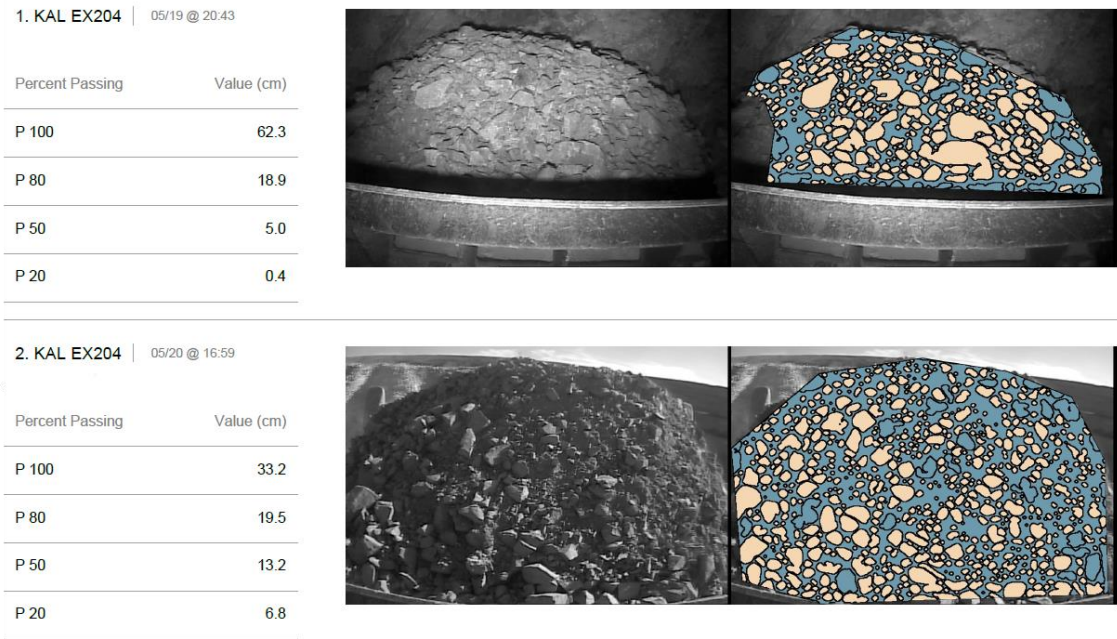


Рисунок 4.11 – Результаты фрагментации, период №2

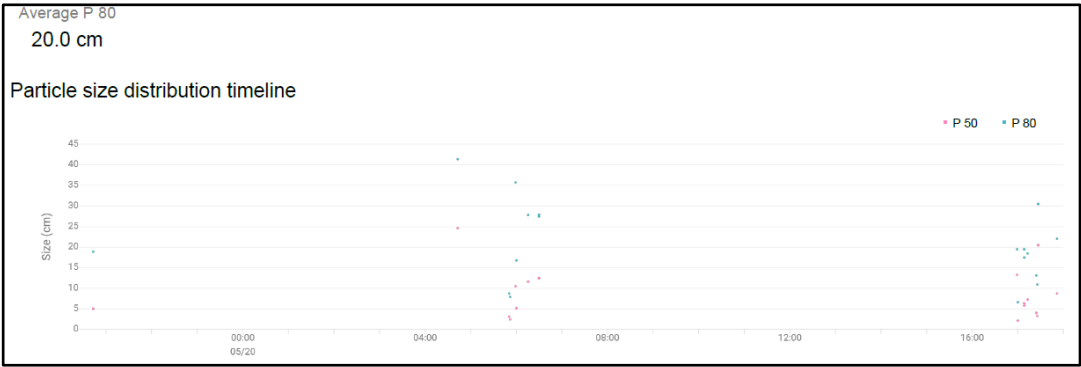
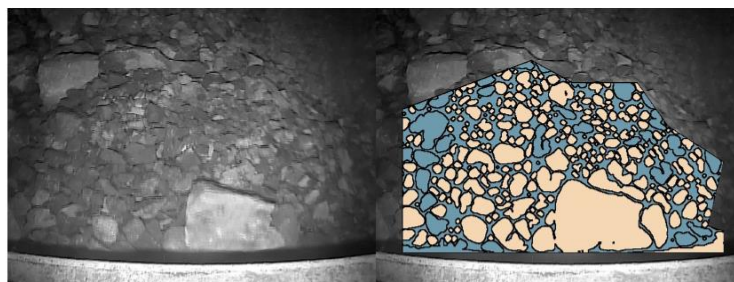


Рисунок 4.12 – Результаты фрагментации, период №3

1. KAL EX205 01/22 @ 22:04	
st_4_400_3	
Percent Passing	Value (cm)
P 100	130.0
P 80	46.6
P 50	5.5
P 20	0.1



2. KAL EX205 01/23 @ 13:41	
st_4_400_3	
Percent Passing	Value (cm)
P 100	39.0
P 80	9.1
P 50	2.7
P 20	0.3

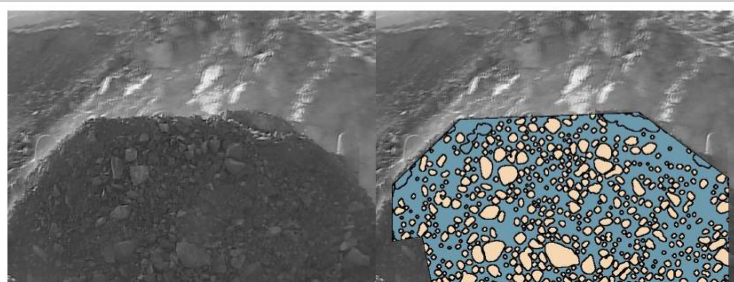


Рисунок 4.13 – Результаты фрагментации, период №3

В период № 3 наблюдался выход негабаритной фракции, что свидетельствует о недостаточной эффективности выбранных параметров взрывных работ. Средний размер фракций по показателю P80 составил 20 см, а максимальный размер отдельного куска достиг 130 см. Данные результаты указывают на ухудшение качества дробления и неравномерное разрушение массива в соответствии с рисунком 4.12 и 4.13.

На основании анализа результатов опытных взрывов, проведенных в периодах № 1 и № 2, которые показали высокую эффективность и удовлетворительное качество фрагментации, было принято решение использовать параметры, применённые в периоде № 2, для дальнейших буровзрывных работ.

Реализация данного подхода позволит достичь значительной экономии затрат. По предварительным расчетам, экономический эффект составит 3 883 393 доллара США в год, что является результатом разницы между текущими расходами в размере 24 918 440 долларов и прогнозируемыми затратами 21 035 047 долларов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертационной работы были достигнуты цели и решены задачи, поставленные в задании на тему «Совершенствование технологии буровзрывных работ на Актогайском месторождении медных руд». Работа полностью соответствует тематике и охватывает широкий комплекс технических, производственных и безопасностных аспектов буровзрывных процессов, проводимых на приконтурных блоках глубоких карьеров.

В процессе исследования проведён всесторонний анализ, а также оценены параметры бурения и взрывания, влияющие на качество фрагментации и устойчивость откосов. Были изучены и апробированы методы применения электронной системы инициирования *I-KON*TM, а также проведён сравнительный анализ схем короткозамедленного взрывания.

Практической частью исследования стали опытно-промышленные испытания предложенных технологических решений, включая оптимизированные схемы бурения, конструкции зарядов и параметры замедления. Использование системы Motion Metrics позволило объективно оценить степень фрагментации породы и подтвердить эффективность разработанных решений. В результате была достигнута значительная экономия средств за счёт снижения негабарита и улучшения качества навала, без увеличения объёма буровзрывных работ.

С научной точки зрения работа представляет ценность благодаря разработке и внедрению комплексного подхода к организации буровзрывных работ на предельных контурах карьеров. Впервые для условий Актогайского месторождения предложена адаптированная схема короткозамедленного инициирования с использованием интеллектуальных технологий контроля фрагментации, а также разработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров бурения и взрывания для повышения эффективности добычи.

Технико-экономическая эффективность предложенной технологии подтверждена в ходе производственных испытаний. Применение электронной системы инициирования и интеллектуального анализа фрагментации позволило добиться повышения производительности, улучшения устойчивости откосов, сокращения затрат на дополнительное дробление и повышение безопасности производства.

Работа завершена формированием рекомендаций по внедрению в производственные процессы оптимизированной технологии буровзрывных работ с применением системы *I-KON*TM и Motion Metrics, что может быть использовано на Актогайском месторождении и аналогичных по условиям карьерах. Полученные результаты обладают научной, практической и социальной значимостью, так как способствуют повышению эффективности и безопасности горных работ в условиях нарастающей сложности разработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 План горных работ месторождение Актогай
- 2 В.А.Фокин, Г.Е.Тарасов, М.Б.Тогунов, А.А.Данилкин, Ю.А.Шитов: Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров- Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2015. - 224 с.
- 3 Джон Рид, Питер Стейси. Екатеринбург: Правовед. Руководство по проектированию бортов карьера, 2015.- 544 с. ISBN 978-5-94782-1062
- 4 О.Г.Латышев, О.О.Казак. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании: учебник Москва, Вологда, 2024.
- 5 И. Б. Картанов, А. А. Сысоев. - Москва; Вологда / Буровзрывные работы на карьерах: учебное пособие. Инфра-Инженерия, 2021.-208 с.: ил., табл. ISBN 978-5-9729-0757-1.
- 6 И. Б. Картанов- Москва; Вологда, Управление безопасностью при буровзрывных работах в карьерах. Инфра-Инженерия, 2021.
- 7 Требования промышленной безопасности при разработке месторождений открытым способом. Астана, 2014 г.
- 8 Лукьянов В. Г. Л84 Взрывные работы: учебник для вузов / В. Г. Лукьянов, В. И. Комащенко, В.А. Шмурыгин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 402 с. ISBN 5-98298-376-4.
- 9 Друкованный М.Ф., Кукиб Б.Н., Куц В.С. Буровзрывные работы на карьерах. – М.: Недра, 2012.
- 10 Кучерявый Ф. И., Друкованный М. Ф., Гаек Ю. В. Короткозамедленное взрывание в карьерах. Сб. ст., М., 2011
- 11 Масаев, Ю. А. Электродетонаторы с электронным замедлением (опыт промышленного применения) / Ю. А. Масаев, В. П. Доманов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2011. № 2. 2010. – С. 102–106.