

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСКАЛЫВАНИЯ МРАМОРИЗОВАННЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ С УЧЕТОМ ИХ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И ПРОЧНОСТИ

М.А. Сарыбаев¹, Р.К. Жанакова², Т.М. Алменов², М.Р. Шаутинов², С.А. Асылханова²

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

² Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru, almen_t@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены вопросы повышения эффективности разработки месторождений природного камня на основе геомеханического обоснования параметров механического раскалывания мраморизованных известняков. Исследование выполнено с использованием комплексного подхода, включающего методы структурной геологии, аналитическое и численное моделирование, а также современные компьютерные технологии для изучения закономерностей строения и структурной нарушенности скального массива. Установлено, что показатели природной блочности и рациональное направление развития горных работ в значительной степени определяются пространственной ориентацией, плотностью и взаимным положением доминирующих систем трещин. Учет указанных факторов позволяет прогнозировать качественные характеристики массива и существенно повышать выход кондиционной продукции. Научная новизна работы заключается в установлении математических зависимостей между геометрическими параметрами трещиноватости массива и эффективностью отделения монолитных блоков при механическом раскалывании. Обосновано применение скважинных разрывателей с тороидальными упругими камерами, обеспечивающих формирование внутри шпуров направленного избыточного давления, достаточного для инициации и управляемого развития магистральной трещины. Определены расчетные значения распорных усилий, обеспечивающие гарантированный отрыв монолитов различной прочности без разрушения краевых зон. Выявлена зависимость оптимального расстояния между осями скважин от их диаметра и предела прочности пород на сжатие. Практическая значимость результатов подтверждается разработкой технологических рекомендаций по применению и эксплуатации механических раскалывающих устройств при добыче мраморизованных известняков. Реализация предложенных параметров позволяет оптимизировать технологический процесс добычи, снизить энергоемкость горных работ и обеспечить высокую степень сохранности целостности извлекаемых блоков природного камня.

Ключевые слова: мраморизованный известняк, трещиноватость массива, природная блочность, механическое раскалывание, скважинный разрыватель, сетки скважин, прочность на растяжение, геомеханическое обоснование, эффективность добычи.

Для цитирования: Сарыбаев М. А., Жанакова Р. К., Алменов Т. М., Шаутинов М. Р., Асылханова С. А. Геомеханическое обоснование параметров механического раскалывания мраморизованных известняков с учетом их трещиноватости и прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 52-77. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_52.

Geomechanical substantiation of mechanical splitting parameters of marbled limestones taking into account their fracturing and strength

M.A. Sarybaev¹, R.K. Zhanakova², T.M. Almenov², M.R. Shautenov², S.A. Assylkhanova²

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru, almenov_t@mail.ru

Abstract: This study aims to improve natural stone quarrying efficiency through the geomechanical substantiation of mechanical splitting parameters for marmorized limestones. The research employs an integrated approach, combining structural geology, analytical modeling, and computer technologies to analyze rock mass structure. It was established that natural blockiness and optimal mining directions depend directly on the spatial orientation and frequency of dominant fracture systems. Accounting for these factors enables quality forecasting and increases the yield of conditioned products. The scientific novelty includes establishing mathematical dependencies between jointing geometry and block separation efficiency. The use of borehole splitters with toroidal elastic chambers to create directional overpressure is substantiated. Calculated force values ensuring the guaranteed separation of monoliths of various strengths were determined. Furthermore, the dependence of optimal borehole spacing on diameter and rock compressive strength was identified. The practical significance is confirmed by technological recommendations for mechanical device operation. Applying these parameters optimizes extraction, reduces energy consumption, and ensures the structural integrity of marmorized limestone blocks.

Key words: marmorized limestone, rock mass jointing, natural blockiness, mechanical splitting, borehole splitter, borehole grids, tensile strength, geomechanical substantiation, mining efficiency.

For citation: Sarybaev M. A., Zhanakova R. K., Almenov T. M., Shautenov M. R., Assylkhanova S. A. Geomechanical substantiation of mechanical splitting parameters of marbled limestones taking into account their fracturing and strength. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026; (11):52-77. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_52.

Введение

Механическое раскалывание горных пород представляет собой управляемый процесс разрушения, при котором порода разделяется на отдельные блоки вдоль естественных или индуцированных трещин. В отличие от традиционного взрывного способа, данный метод направлен на снижение разрушения породы вне зоны раскалывания, минимизацию потерь полезного материала и уменьшение энергоемкости технологического процесса. Для мраморизованных известняков, обладающих сложной метаморфической текстурой и высокой ценностью

как строительный и декоративный материал, механическое раскалывание является особенно актуальным, поскольку позволяет получать крупные блоки высокой прочности и минимальными повреждениями.

Физико-механические свойства мраморизованных известняков существенно определяются их структурой и трещиноватостью. Порода характеризуется развитой системой естественных трещин различного масштаба, а также анизотропией прочностных свойств, что напрямую влияет на поведение массива при приложении внешней нагрузки. Тре-

щиноватость снижает прочность на растяжение и сдвиг, формирует зоны концентрации напряжений и задает направления, по которым будет происходить разрушение. Эти особенности необходимо учитывать при выборе технологии раскалывания и параметров воздействия.

Оценка прочностных характеристик пород является ключевым элементом геомеханического обоснования. Определение прочности на растяжение, сжатие, модуля упругости и коэффициентов Пуассона позволяет прогнозировать появление и распространение трещин. Для мраморизованных известняков наличие трещин в массиве может значительно снижать критическую нагрузку, при которой начинается раскалывание, и изменять симметрию процесса разрушения. Поэтому эксперименты по растяжению и сжатию, а также косвенные методы, такие как Brazilian Test, являются необходимыми для получения достоверных данных.

Трещиноватость породы является не только ограничивающим фактором прочности, но и инструментом для эффективного раскалывания. Определение плотности, длины и ориентации трещин позволяет прогнозировать пути распространения разрушения и планировать направление раскалывания. Эффективность механического раскалывания повышается при учете естественных линий слабости массива и правильной ориентации скважин и приложенного усилия.

Современные методы численного моделирования играют важную роль в геомеханическом обосновании параметров раскалывания. Использование методов конечных и дискретных элементов позволяет учитывать сложную геометрию трещин, анизотропию пород и нелинейные механические свойства материала. Моделирование помогает прогнозировать развитие трещин в массиве, оценивать распределение напряжений и оптими-

зировать параметры технологического воздействия, включая силу и ориентацию инструментов раскалывания. Исследования, посвященные геомеханическому моделированию и оптимизации буровзрывных работ на карьерах открытой добычи, демонстрируют, что интеграция данных моделирования с геодезическим и геофизическим контролем позволяет повысить эффективность добычи и минимизировать разрушение массива [1, 2]. Моделирование геомеханических процессов при переходе от открытых карьеров к подземной разработке с комплексной морфологией массива позволяет прогнозировать перераспределение напряжений и зоны локализации трещин.

Разработка подземных горных выработок и обоснование геотехнологии при сложной морфологии месторождений, подтвержденные на примере рудника Акжал, показывают необходимость учета неоднородности массива и особенностей трещиноватости при проектировании подземных выработок [3]. При этом оценка потерь руды и разведочного разбавления позволяет корректировать планирование добычи, повышая экономическую эффективность месторождения [4]. Контроль устойчивости бортов и террас карьеров с использованием современных методов мониторинга позволяет снизить риск аварийных ситуаций и повысить безопасность эксплуатации [5].

Особое внимание уделяется развитию методов укрепления подземных выработок. Применение инновационных составов бетонных смесей и методов армирования позволяет улучшить устойчивость массивов и снизить влияние трещиноватости на целостность выработок [6, 7]. Мониторинг устойчивости массивов по состоянию прибортовых зон дополнительно обеспечивает надежное прогнозирование возможных деформаций и предотвращение аварийных си-

туаций [8, 9]. Применение управляемых механических и гидромеханических методов раскалывания, включая эластичные тороидальные гидроразрыватели, позволяет точно контролировать направление и размеры получаемых блоков [10–12].

Современные исследования подчеркивают, что геомеханическое обоснование параметров механического раскалывания мраморизованных известняков должно базироваться на комплексной интеграции данных о прочности пород, трещиноватости, напряженно-деформированном состоянии массива и инженерно-геологических условиях. Такой подход обеспечивает повышение эффективности технологических процессов, точность прогноза поведения массива.

В работе рассматриваются вопросы повышения эффективности разработки месторождений природного камня на основе геомеханического обоснования параметров механического раскалывания мраморизованных известняков. Цель исследования — установление закономерностей влияния трещиноватости массива на эффективность отделения монолитных блоков и обоснование рациональных параметров раскалывания.

Исследование выполнено с использованием комплексного подхода, включающего методы структурной геологии, аналитическое и численное моделирование, а также современные цифровые технологии анализа строения и нарушения скального массива. Установлено, что показатели природной блочности и рациональное направление развития горных работ в значительной степени определяются пространственной ориентацией, плотностью и взаимным положением доминирующих систем трещин. Учет этих факторов позволяет прогнозировать качественные характеристики массива и существенно повышать выход кондиционной продукции.

Научная новизна работы заключается в установлении математических зависимостей между геометрическими параметрами трещиноватости массива и эффективностью отделения монолитных блоков при механическом раскалывании. Обосновано применение скважинных разрывателей с тороидальными упругими камерами, обеспечивающих формирование направленного избыточного давления в шпурах, достаточного для инициации и управляемого развития магистральной трещины. Определены расчетные значения распорных усилий, обеспечивающие гарантированный отрыв монолитов различной прочности без разрушения краевых зон. Установлена зависимость оптимального расстояния между осями скважин от их диаметра и предела прочности пород на сжатие.

Практическая значимость результатов подтверждается разработкой технологических рекомендаций по применению механических раскалывающих устройств при добыче мраморизованных известняков. Реализация предложенных параметров позволяет оптимизировать технологический процесс, снизить энергоемкость работ и обеспечить высокую степень сохранности извлекаемых блоков.

Обзор литературы

Исследование параметров добычи блочного камня требует комплексного и детального анализа внутренней структуры горного массива, поскольку именно структурно-тектонические особенности в наибольшей степени определяют технологическую эффективность и качество извлекаемой продукции. Мраморизованные известняки характеризуются выраженной анизотропией физико-механических свойств, обусловленной как процессами регионального и контактного метаморфизма, так и особенностями микроструктуры кальцитовых зерен, их

ориентировкой, степени перекристаллизации и наличием межзерновых контактов [13]. Указанные факторы формируют неоднородное распределение прочности и деформационных характеристик, что существенно осложняет прогнозируемость процесса разрушения.

Современные исследования в области добычи облицовочного и блочного камня подтверждают, что сохранение природной целостности структуры массива является приоритетным технологическим условием. В этой связи метод механического раскалывания рассматривается как наиболее эффективный и ресурсосберегающий по сравнению с традиционными методами, основанными на динамических нагрузках, включая буровзрывные работы [14, 15]. Применение взрывных технологий, как правило, сопровождается развитием вторичных трещин, микродефектов и зон дробления, что приводит к снижению выхода кондиционных блоков и ухудшению их товарных характеристик.

Физической основой механического раскалывания является значительная разница в сопротивлении горных пород сжатию и растяжению. Установлено, что для метаморфических карбонатных пород предел прочности на растяжение в среднем в 10–15 раз ниже предела прочности на сжатие [16]. Данное соотношение обуславливает высокую эффективность клиновых и распорных механизмов, создающих в стенках шпуров локальные растягивающие напряжения, достаточные для инициации направленной магистральной трещины при относительно малых энергетических затратах.

При обосновании рациональных параметров добычи ключевое значение приобретают не столько свойства отдельного образца породы, сколько интегральные характеристики всего массива. В этом контексте естественная трещиноватость рассматривается как домини-

рующий структурный фактор, формирующий потенциальные поверхности раскола. Геометрические параметры сетки шпуров — шаг, глубина и ориентация — должны быть строго синхронизированы с системами главных и второстепенных трещин массива с целью минимизации потерь сырья, предотвращения неконтролируемого разрушения и повышения выхода блоков заданных размеров [17, 18].

Ряд авторов научно обосновывает, что совпадение вектора механического воздействия с направлением преобладающих систем естественных трещин приводит к значительному снижению энергоемкости процесса разрушения и повышению управляемости раскола [19, 20]. Вместе с тем наличие скрытых микротрещин, а также их пространственная ориентация, включая угол наклона и степень сопряженности, могут вызвать отклонение магистральной трещины от расчетной траектории. Это обстоятельство требует предварительного определения коэффициента структурного ослабления массива, а также его классификации по качеству с использованием современных геомеханических систем оценки [21].

Процесс разрушения при механическом раскалывании в большинстве работ описывается в рамках теории хрупкого разрушения, применимой к прочным и среднепрочным карбонатным породам. Для численного анализа напряженно-деформированного состояния массива и стенок шпуров в современной практике широко применяется метод конечных элементов в сочетании с обновленным критерием Хозка–Брауна, учитывающим индекс геологической прочности (GSI) и степень структурной нарушенности массива. Использование указанных моделей позволяет определить критическое распорное усилие, необходимое для инициации трещины без разрушения сте-

нок шпура и образования зон раздавливания.

Важным аспектом является коалесценция (слияния) зон предразрушения между соседними шпурами. Для получения качественной поверхности скола необходимо обеспечить объединение микротрещин до наступления пластических деформаций, что предотвращает деструкцию краев блока и повышает общую продуктивность карьера.

Для получения ровной и качественной поверхности скола необходимо обеспечить объединение микротрещин на стадии упругого деформирования, до перехода породы в пластическое состояние. Это позволяет предотвратить деструкцию краевых зон блока, снизить количество дефектов и повысить общую производительность горных работ [22].

К основным расчетным параметрам процесса механического раскалывания относятся шаг шпуров, их глубина и линия наименьшего сопротивления. Современные эмпирические, статистические и численные зависимости связывают указанные параметры с диаметром шпуров, прочностными характеристиками породы, структурной нарушенностью массива, а также типом применяемого оборудования, включая алмазноканатные установки, расширяющиеся химические смеси и гидроклиновые системы [23].

Актуальным направлением современных исследований является интеграция цифровых методов диагностики массива и специализированных систем классификации, ориентированных именно на задачи добычи облицовочного и блочного камня. Применение цифрового картирования трещиноватости, геостатистического анализа и численного моделирования позволяет в режиме, близком к реальному времени, корректировать параметры сетки шпуров с учетом выявленных структурных неоднородно-

стей, обеспечивая максимальный выход кондиционных блоков и повышение экономической эффективности разработки месторождения [22, 23].

Объект и особенности условий исследования

Проектирование параметров горных работ на карьерах облицовочного камня требует строгого учета ориентации систем трещин. Качество добываемой продукции и выход кондиционных блоков зависят не только от количественных показателей трещиноватости, но и от пространственно-геометрических параметров структурных отдельностей. Несмотря на обширную теоретическую базу, вопросы влияния азимутов залегания систем трещин на выбор оптимальных векторов механического раскалывания мраморизованных известняков остаются недостаточно изученными.

Структурно-геомеханическая схема месторождения Акбастау–Кызылсай (см. рис. 1) отражает пространственное расположение элементов геологического строения, определяющих механические свойства массива мраморизованных известняков и характер их разрушения при раскалывании. На схеме показаны контур месторождения, ориентировка оси складчатой структуры, две сопряженные системы естественной трещиноватости, реконструированный эллипс деформации и изменение углов падения пластов по площади месторождения.

Формирование массива происходило в условиях регионального тектонического сжатия, в результате которого образовались две преобладающие системы трещин, пересекающиеся под углами, характерными для сопряженных разрывных нарушений. Эти системы являются основными поверхностями структурного ослабления и оказывают определяющее влияние на распространение трещин при приложении раскалывающей нагрузки.

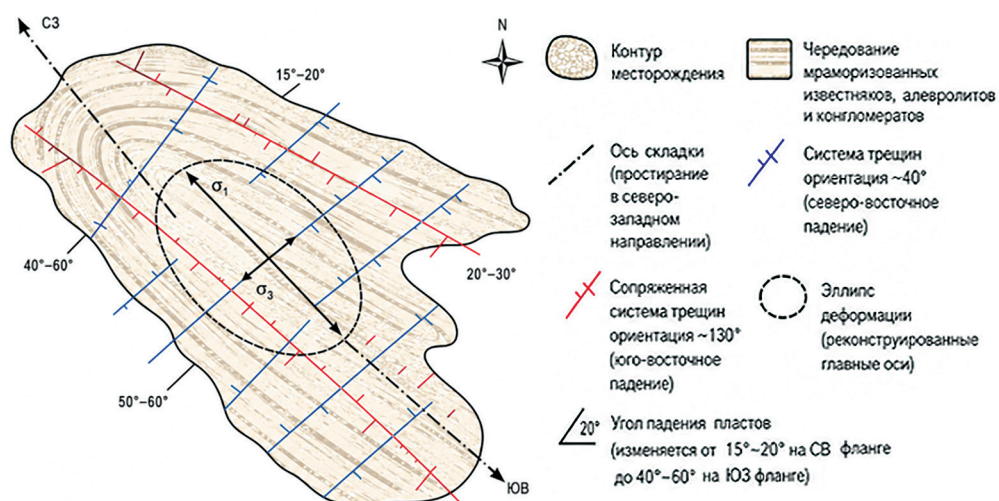


Рис. 1. Структурно-геомеханическая схема массива мраморизованных известняков месторождения Акбастау–Кызылсай

Fig. 1. Structural-geomechanical scheme of the marbled limestone mass of the Akbastau-Kyzylsai

Изменение углов падения пластов от 15–20° на северо-восточном фланге до 40–60° на юго-западном свидетельствует о неоднородности напряженно-деформированного состояния массива. Вследствие этого сопротивление механическому раскалыванию изменяется на различных участках месторождения, что необходимо учитывать при выборе направления приложения раскалывающего усилия.

Реконструированный эллипс деформации характеризует преобладающие направления структурной анизотропии массива. Совместный анализ ориентировки трещиноватости, элементов складчатого строения и направлений главных деформаций позволяет определить наиболее благоприятные направления развития магистральной трещины при механическом раскалывании. Ориентация линии раскалывания вдоль естественных плоскостей ослабления обеспечивает снижение удельной энергоемкости процесса, уменьшение вероятности образования вторичных трещин и повышение выхода кондиционных блоков мраморизованных известняков.

Для оценки пригодности массива к механическому раскалыванию проведено районирование по степени блочности согласно ГОСТ 9479-2011. На исследуемом месторождении зафиксированы показатели, соответствующие III и IV категориям блочности. Высокая интенсивность трещиноватости предопределяет необходимость прецизионного обоснования шага шпуров и усилия распора при механическом раскалывании, чтобы минимизировать риски неконтролируемого разрушения камня.

В качестве сопоставимых объектов для сравнительного анализа геомеханических параметров структурных отделностей были привлечены также месторождения мрамора Екпенди и Каратау. Это позволило расширить базу данных для верификации предлагаемых технологических решений по механическому расколу в различных горно-геологических условиях.

Методы исследований

Методология данной работы базируется на комплексном подходе, сочетающем фундаментальные принципы струк-

турной геологии, кристаллографии и геомеханики. Процесс исследования выстроен по принципу «от микроструктуры к макромассиву», что позволяет обосновать параметры механического воздействия на породу, исходя из ее генетической природы.

Первый этап исследований направлен на выявление первопричин формирования трещиноватости. Методика микроструктурного анализа основывается на изучении кристаллической решетки кальцита как базисного элемента мраморизованных известняков. Исходя из того, что углы естественной спайности кристаллов и их ромбоэдрическая форма предопределяют плоскости минимального сопротивления, данный метод позволяет установить связь между микродефектами и направлением будущих магистральных трещин.

Параллельно применяется структурно-геометрический анализ, в основу которого заложен принцип «золотого сечения». Этот метод позволяет рассматривать тектоническую сеть месторождения как строго упорядоченную систему. Путем сопоставления региональных тектонических линий с локальными замерами азимутов трещин выстраивается геометрическая модель массива. Переход от теоретических моделей к натурным условиям осуществляется через анализ деформационных процессов. Основным инструментом здесь выступает построение эллипсоида деформации, который описывает состояние карбонатного массива в процессе его складкообразования. Методика позволяет дифференцировать участки массива по степени их хрупкости и нарушенности.

Визуализация трещиноватости непосредственно в забое карьера позволяет разделить трещины на первичные (генетические) и вторичные (техногенные). Сравнительный анализ данных с месторождений Акбастау-Кызылсай, Екпен-

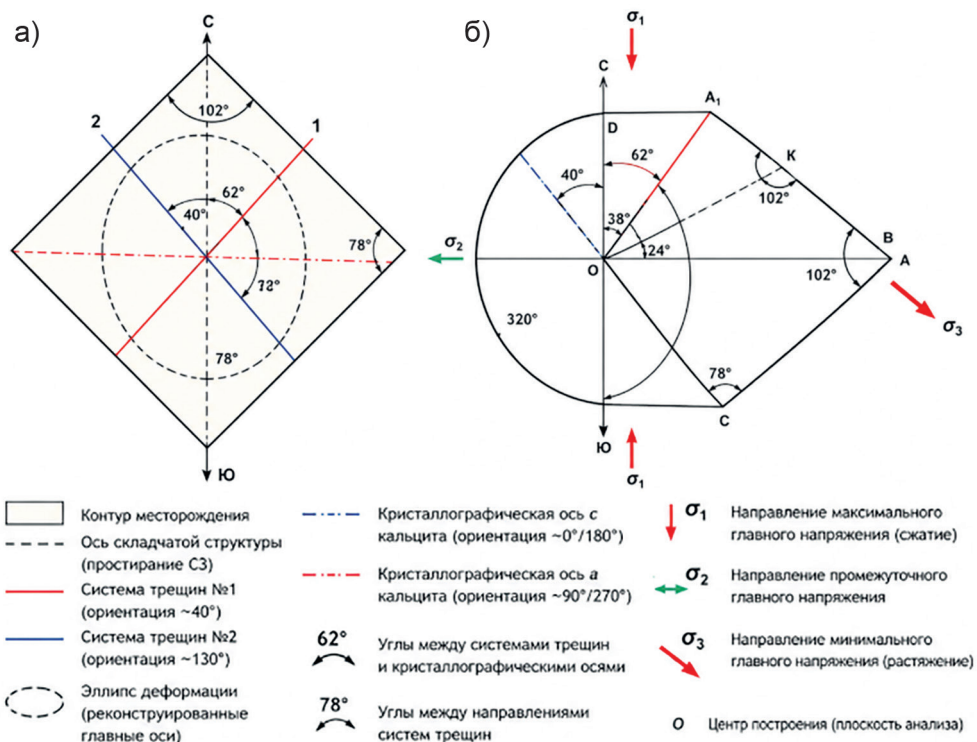
ди и Каратау позволяет верифицировать полученные закономерности и подтвердить универсальность выбранного геометрического подхода для различных типов мраморизованных известняков.

Заключительный этап связывает структурные особенности массива с технологией его разрушения. В основу заложена аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности шпура.

Методика предполагает расчет критических значений растягивающих напряжений, необходимых для инициации разрыва. При этом учитывается угол ориентации трещин относительно вектора прикладываемой нагрузки. Исследование базируется на принципе снижения энергоемкости раскола при совпадении искусственно создаваемого поля напряжений с природными плоскостями ослабления, выявленными на первом этапе анализа. Это позволяет определить оптимальный шаг шпуров и давление распора, гарантирующее получение ровной поверхности скола без деструкции краев блока.

На рис. 2 представлена геомеханическая модель, отражающая взаимосвязь естественной трещиноватости и ориентировки главных напряжений массива мраморизованных известняков. Модель построена на основе структурно-геометрического анализа и предназначена для оценки влияния природной анизотропии массива на условия иницирования и распространения трещин при механическом раскалывании.

На рис. 2, а показано взаимное расположение двух преобладающих систем естественной трещиноватости относительно кристаллографической ориентировки кальцита. Угловые соотношения между системами трещин характеризуют закономерности формирования структурной анизотропии массива и определяют направления, вдоль которых сопротив-



1, 2 — система естественной трещиноватости; А, А₁, В, С, D, К — характерные точки геометрической модели, используемые для построения угловых зависимостей между кристаллографическими направлениями кальцита, системами естественной трещиноватости и главными напряжениями массива; 40°, 38°, 24°, 62°, 78°, 102° — углы между направлениями главных напряжений, системами трещиноватости и кристаллографическими осями, характеризующие степень структурной анизотропии массива

Рис. 2. Геомеханическая модель взаимосвязи трещиноватости и главных напряжений массива: взаимное расположение систем трещиноватости и кристаллографических осей кальцита (а); схема геомеханической интерпретации структурных элементов (б)

Fig. 2. Geomechanical model of the relationship between fracture systems and the principal stress field of the rock mass: mutual orientation of fracture systems and calcite crystallographic axes (a); schematic diagram of the geomechanical interpretation of structural elements (b)

ление разрушению является минимальным. Совпадение отдельных направлений трещиноватости с преимущественными плоскостями спайности кальцита свидетельствует о влиянии кристаллографического строения минерала на развитие природных поверхностей ослабления.

На рис. 2, б представлена геомеханическая интерпретация структурной модели, включающая направления главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 . Вектор σ_1 соответствует направлению максималь-

ного главного сжатия, σ_2 — промежуточного, а σ_3 — минимального главного напряжения, определяющего наиболее вероятное направление раскрытия трещин. Геометрическая схема позволяет установить взаимную ориентировку главных напряжений и естественной трещиноватости, определяющую механизм зарождения и дальнейшего распространения магистральной трещины в процессе механического раскалывания.

Полученные результаты показывают, что эффективность механического рас-

калывания в значительной степени определяется пространственным совпадением направления прикладываемой нагрузки с естественными поверхностями структурного ослабления массива. Ориентация раскалывающего усилия с учетом положения главных напряжений и систем трещиноватости способствует снижению удельной энергоемкости разрушения, уменьшению вероятности образования вторичных трещин и повышению выхода кондиционных блоков мраморизованных известняков.

Микроструктурные элементы кристаллов кальцита в шлифах показали наличие ромбоэдрической формы, ее зеркального отражения (эффект двойникования), а также различных граничных условий связей между агрегатами. В результате данной комбинации были выявлены два основных направления, образующие углы $102^\circ - 78^\circ$.

Эти направления проходят по плоскостям двойникования, по контактам кристаллических зерен и диагоналям ромбоэдров либо по вновь образованным микротрещинам, пересекающим кристаллические агрегаты. В точках пересечения этих направлений присутствуют в той или иной степени изометричные мелкие частицы. На основании этого целесообразным представляется проектирование движения забоя таким образом, чтобы основная деформация массива происходила вдоль указанных направлений. При опытной разработке карьера горные работы развивались в направлении азимута $270^\circ - 272^\circ$.

После внедрения данных рекомендаций забой был ориентирован по направлению одной из сторон ромба с азимутом 320° .

В результате выход блоков в среднем увеличился на 4,9% и составил 22,9%. Таким образом, развитие деформаций на месторождении происходит по направлениям с азимутами 320° и 62° , и имен-

но в этих направлениях ориентированы стороны структурных блоков.

Разработку месторождения мраморизованных известняков Акбастау-Кызылсай целесообразно осуществлять путем перемещения забоя вдоль направления одной из сторон параллелограмма, образованного азимутами простиражения тектонических трещин. Большая и малая оси эллипса указывают направление параллелепипедных структурных особенностей месторождения. Длинная сторона разделения ориентирована на северо-запад.

Наблюдения проявлений разрушения массива позволили выявить четыре си-

Таблица 1

Ориентировка основных систем трещин по результатам полевых измерений
Orientation data of the main joint systems based on field measurements

Системы	Азимуты, град		Угол падения, град
	простираания	падения	
1	62	152	74
2	320	50	77
3	10	100	76
4	186	276	66

Таблица 2

Угловые параметры взаиморасположения систем трещиноватости в массиве
Angular relationships between the identified joint systems

Системы трещин	Острые углы, град
1 – 2	71
1 – 3	70
1 – 4	63
1 – 5	62
2 – 3	71
2 – 4	75
2 – 5	63
3 – 4	78
4 – 5	55

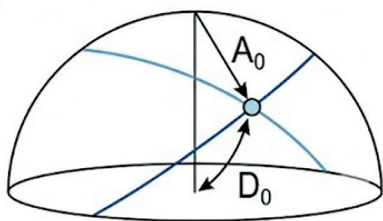


Рис. 3. Схема определения параметров линии пересечения двух плоскостей на сфере

Fig. 3. Diagram for determining the parameters of the intersection line of two planes on a sphere

стемы крутых трещин в мраморизованных известняках. Вместе с одной системой пологого падения они образуют пять систем трещиноватости. Средние результаты измерений приведены в табл. 1.

Для определения двугранного угла применяются несколько методов:

- аналитический (по координатам точек);
- графо-аналитический — по проекциям с числовыми обозначениями (метод Соболевского);
- метод стереографических проекций (метод аль-Баттани).

Результаты расчетов этих углов приведены в табл. 2. Важнейшими характеристиками системы трещин являются элементы их залегания, определяемые по формуле аль-Баттани, а также линии их пересечения.

Геометрическая интерпретация пространственных соотношений структурных элементов массива представлена на рис. 3. Использование стереографической проекции на поверхность полусферы позволяет наглядно отобразить положение двух пересекающихся плоскостей в массиве горных пород, имитируемых на схеме дугами больших кругов. Точка смыкания данных дуг является графическим решением задачи по определению единой линии их пересечения. Подобная визуализация имеет определяющее значение для анализа геомеханических процессов, так как имен-

но вдоль линии стыка структурных неоднородностей наиболее вероятно возникновение концентрации напряжений и последующих деформационных смещений.

Сфера служит вспомогательной геометрической поверхностью, на которую проецируются исследуемые плоскости. Точка пересечения дуг больших кругов соответствует пространственному положению линии пересечения рассматриваемых плоскостей. Параметр A_0 характеризует угловое положение линии пересечения относительно вертикальной оси проекции и используется для определения ее азимута. Параметр D_0 определяет угловое отклонение линии пересечения от горизонтальной плоскости и соответствует ее углу погружения (падения).

$$\operatorname{tg} A_0 = \frac{\sin A \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{(\operatorname{tg} \delta_1 \cos A - \operatorname{tg} \delta_2)} \quad (1)$$

$$\sin D_0 = \frac{\sin A}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \delta_1 + \operatorname{ctg}^2 \delta_2 + \sin^2 A}}, \quad (2)$$

где A_0 — азимут линии; A — вспомогательный горизонтальный угол; δ_1, δ_2 — углы падения направлений.

Расчетные значения этих величин составляют: $A_0 = 65^\circ$; $D_0 = 28^\circ$. Скрытые микротрещины в основном связаны с дислокациями, возникающими между кристаллами (и внутри них), образующими данную породу. Эти микротрещины, соответствующие кристаллическим зернам горных пород, чаще всего обуславливают развитие крупных трещин.

Карбонатные соединения в природе имеют кристаллическую форму тригональной сингонии и характеризуются ромбоэдрической спайностью. Углы данного ромбоэдра находятся в пределах $102^\circ - 104^\circ$. Практически все горные породы состоят из кристаллических веществ. В условиях мономинерального

состава горных пород кристаллические формы сохраняются в тектонических и структурных блоках.

В массиве горных пород формирование систем трещин подчиняется тем же закономерностям, что и образование кристаллических форм и структуры горных пород. На рассматриваемом месторождении для первых двух систем характерны следующие элементы залегания: азимут простирания 62° , азимут падения 152° , угол падения 74° ; азимут простирания 32° , азимут падения 50° , угол падения 77° . Угол между азимутами 102° , что соответствует углу между гранями ромбоэдра кристалла кальцита — исландского шпата.

Методы анализа деформационных процессов в карьере

Для определения характера деформационных процессов на нерабочем борту карьера был проведен комплекс маркшейдерских наблюдений. С этой целью были заложены наблюдательные станции (девять профильных линий на восточном, шесть — на центральном и восемь — на западных участках). Кроме того, выполнена тахеометрическая съемка трещин отрыва на дневной поверхности и по всем горизонтам.

В статье отмечается, что угол откоса борта составляет 60° , однако проектные параметры борта карьера фактически не соблюдаются. На борту формируются зоны деформаций, в пределах которых угол откоса выполаживается до угла естественного откоса. Поверхности скольжения, рассчитанные и построенные по известным методикам, не всегда соответствуют данным натурных наблюдений.

Для условий месторождения Акбастау-Кызылсай предлагается методика, результаты которой согласуются с данными натурных наблюдений. При расчете устойчивости горных выработок

необходимо определить удерживающие касательные напряжения $\tau_{уд}$ и касательные напряжения $\tau_{сд}$, возникающие под воздействием внешней нагрузки. При известных значениях этих напряжений коэффициент устойчивости определяется как

$$n = \tau_{уд} / \tau_{сд}. \quad (3)$$

При $n = 1$ состояние считается предельным.

Для оценки устойчивости структурных блоков массива при механическом раскалывании разработана расчетная геомеханическая схема силового взаимодействия на естественной плоскости трещины (рис. 4). Схема отражает распределение внешней нагрузки и внутренних сил, определяющих возможность смещения блока вдоль природной поверхности ослабления.

Внешнее раскалывающее усилие Q прикладывается к блоку мраморизованного известняка и вызывает формирование напряженного состояния в зоне контакта с естественной трещиной. Под действием нагрузки на плоскости трещины возникают нормальная сила N , воспринимаемая поверхностью контакта, и касательное напряжение сдвига $\tau_{сд}$, направленное вдоль плоскости трещины и способствующее смещению блока. Противодействие смещению оказывает удерживающее касательное напряжение $\tau_{уд}$, обусловленное силами сцепления и трением между контактирующими поверхностями.

Положение плоскости естественной трещины характеризуется углом β относительно горизонтали, тогда как угол α определяет направление приложения внешней нагрузки. Угол δ соответствует отклонению результирующей силы от нормали к плоскости трещины и характеризует соотношение нормальной и касательной составляющих нагрузки. Изменение указанных углов оказывает непосредственное влияние на величину

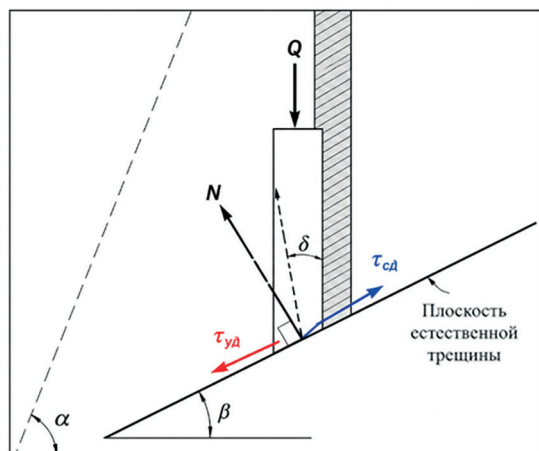


Рис. 4. Структурная часть с нагрузкой на перемещение
Fig. 4. Structural part with displacement load

ну напряжений, возникающих в зоне контакта, и, следовательно, на устойчивость структурного блока.

На рис. 3 показано, что на структурный элемент δ в скользящей линии воздействует направленная вниз перемещающая сила:

$$\tau_{сд} = Q \sin \beta, \quad (4)$$

где Q — гравитационная сила, ($Q = \gamma H$); β — угол наклона скользящей поверхности. В элементарном интервале ab существует касательное напряжение $\tau_{уд}$, которое противодействует $\tau_{сд}$. Нарушение устойчивого равновесия по поверхности скольжения происходит, когда выполняется следующее условие:

$$\tau_{сд} > \tau_{уд}. \quad (5)$$

При прямоугольной форме, касающейся круга моря, из паспорта прочности для однородного напряжения

$$\tau_{уд} = c(1 + \sin \rho). \quad (6)$$

В данном случае c — это сплоченность образца; ρ — угол внутреннего трения. Подставив значения $\tau_{сд}$ и $\tau_{уд}$ в это условие, мы получаем следующее условие.

Q — внешнее раскалывающее усилие (нагрузка, прикладываемая к структурному блоку), Н;
 N — нормальная сила, действующая перпендикулярно плоскости естественной трещины, Н;
 $\tau_{сд}$ — касательное напряжение сдвига, возникающее вдоль плоскости естественной трещины под действием внешней нагрузки, МПа;
 $\tau_{уд}$ — удерживающее касательное напряжение, обусловленное силами сцепления и внутреннего трения на плоскости трещины, МПа;
 α — угол приложения внешнего раскалывающего усилия относительно горизонтальной плоскости, град;
 β — угол наклона плоскости естественной трещины к горизонтали, град;
 δ — угол между направлением результирующей силы и нормалью к плоскости естественной трещины, град

Путем изменения значений угла перемещения (β) в диапазоне от 90° до 0° была получена траектория линии перемещения. Рассчитанные координаты точек этой линии и соответствующие им значения глубины (H) приведены в табл. 3.

$$H = A / \sin \beta \quad (7)$$

$$A = \frac{c(1 - \sin \rho)}{\gamma} e^{-\frac{W}{2 \tan \phi}}, \quad (8)$$

где H — глубина (или высота) переходной точки профиля откоса, м; β — угол наклона откоса (или результирующей линии); A — вспомогательный параметр с размерностью длины, м; c — сцепление пород, МПа; ρ — плотность пород, кг/м^3 ; γ — удельный вес пород, кН/м^3 ; W — характерная ширина зоны (уступа или зоны влияния), м; ϕ — угол внутреннего трения; e — основание натурального логарифма (экспоненциальная функция).

Для построения схемы обработки блоков и формирования зоны деформации поверхности на маркшейдерском плане используются последовательные геометрические построения. От границы земной поверхности проводят вертикаль-

Таблица 3

Рассчитанные координаты точек линии перемещения при различных значениях угла перемещения (β)

Calculated coordinates of the displacement line points at various displacement angles (β)

Угол перемещения β , град	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$1/\sin\beta$	1,00	1,02	1,06	1,16	1,31	1,56	2,00	2,93	5,75
Глубина, Н, м	15,0	15,2	16,0	17,3	19,5	23,3	30,0	43,9	86,2

ную линию, соответствующую глубине разработки H . Их значение соответствует значению H при $\beta = 90^\circ$. От нарисованного конца линии до горизонта проводится линия, наклоненная на 80° . Затем, при $\beta = 80^\circ$, из уровня земли проводится вторая вертикальная линия длиной H . Через полученную точку проводится следующая наклонная линия под углом 70° . Далее линии проводятся в том же порядке.

По этой методике поверхность отклонения рисуется на бумаге в соответствии с масштабами маркшейдерских планов (рис. 5).

На рис. 6 представлена графическая интерпретация зависимости параметров деформации борта карьера и глубины залегания блоков от их ширины. На основе этих данных можно охарактеризовать этапы отработки. Привязка блоков I и II (с шириной $B I$) осуществ-

ляется к левой части графика (при $B I = 3$ м). В этой зоне угол деформации борта карьера (синяя линия) является высоким (при 70°), что указывает на крутой откос. Глубина залегания блоков $H I$ и $H II$ (серая линия) в этой области растет незначительно, оставаясь в пределах безопасных значений (15–18 м). Блок III (с шириной $B III$) — планируемый.

При планировании этого блока необходимо учитывать нелинейный характер изменения параметров. Если ширина $B III$ будет увеличена (до 7 м), угол деформации борта снизится до 30° , что улучшит устойчивость. Однако при дальнейшем увеличении ширины ($B > 7$ м) график показывает резкий, экспоненциальный рост глубины залегания ($H III$ достигнет 45–85 м), что может критически осложнить условия добычи. В итоге механизм деформации борта карьера

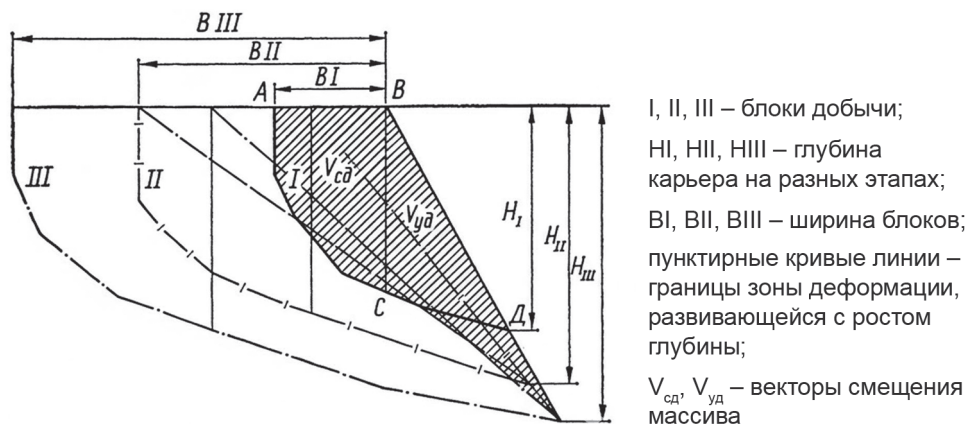


Рис. 5. Схема отработки блоков и формирование зоны деформации

Fig. 5. Schematic of mining blocks and the formation of the deformation zone

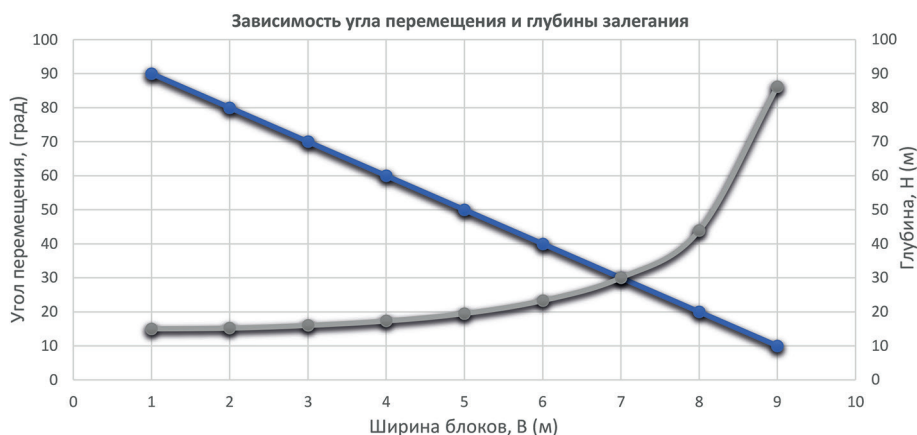


Рис. 6. Зависимость площади деформационной зоны от глубины карьера
 Fig. 6. Dependence of the deformation zone area on the depth of the quarry

следующий. Часть горной породы, расположенная под прямым уклоном, находится в стабильном состоянии. Поэтому стабильность горных пород под уклоном может быть нарушена под воздействием массивов горных пород за пределами уклона. В карьере Каратау горные породы присутствуют на четырех горизонтах. Работы по добыче ведутся с помощью камнеобрабатывающих машин СМ 177 А. Система разработки — высокая уступная двухступенчатая фронтальная.

Добыча блоков мрамора осуществляется с помощью горизонтальных уступов с параллельными площадками, угол уклона составляет 90° .

В процессе исследования были определены характеристики деформационных процессов и угол смещения горных пород, принимающий различные значения от 90° до 0° . На поверхности земли и по всем горизонтам была проведена тахеометрическая съемка сечений трещин [23].

Основная идея исследования заключается в том, чтобы, используя порядок нарушения равновесия твердых горных пород, реализовать их деление на определенные фигуры. В ходе исследования для обеспечения одинакового предель-

ного равновесия были использованы площади треугольников.

Во время маркшейдерских наблюдений учитывались векторы смещения реперов. Исходя из этих данных, разделение горных пород на определенные блоки представляет собой очень актуальную задачу. Оптимальное использование трещин, находящихся в горных породах, позволяет эффективно разрабатывать массив, а использование гранитоподобных твердых горных пород с высоким качеством является очень целесообразным.

Обсуждение результатов

При выполнении работы сначала была исследована система трещин в пределах изучаемой рудной площади. После обработки материала возник вопрос о сравнении этого результата со структурными элементами массива как в крупном, так и в мелком масштабах. То есть нужно было определить связь тектоники трещин с элементами геологического строения данной площадки, а затем района, а также с кристаллической структурой минерала — кальцита. Поскольку здесь горная порода мономинеральная, то она состоит преимущественно из кристаллов кальцита и в небольшом количе-

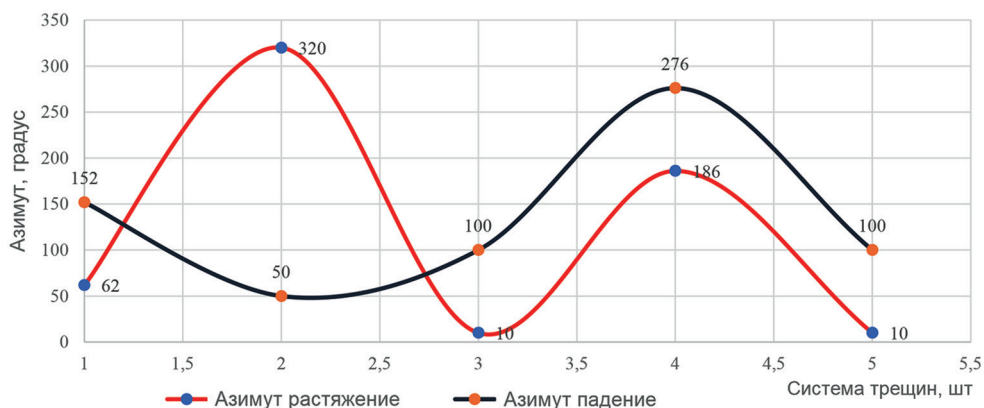


Рис. 7. Формирование систем трещин с учетом азимута
Fig. 7. Formation of crack systems taking into account the azimuth

стве из других карбонатных минералов. В связи с этим шлифы были исследованы простым способом, также были изучены шлифы, полученные из направленных природных частей горных пород.

Как было сказано выше, месторождение строительных камней связано с крыльями антиклинали. Нагорная складчатость Илийских гор является основной осевой направленностью этой антиклинали. Ее направление с углом падения 77° составляет 320° . Это первичный складчатый процесс (рис. 7).

На представленном графике (рис. 8) приведено сопоставление формирова-

ния острых углов трещин для массивов с различной степенью нарушенности. Желтая линия соответствует категории «сильно трещиноватые» породы, характеризующиеся наиболее высокими значениями углов (в диапазоне $62^\circ - 78^\circ$). Зеленая линия отражает динамику для среднетрещиноватых массивов. Наблюдаемая корреляция показывает, что с увеличением интенсивности трещиноватости значения острых углов имеют тенденцию к росту, при этом в точке 9 (система трещин № 9) показатели обеих категорий конвергируют к единому значению 55° .

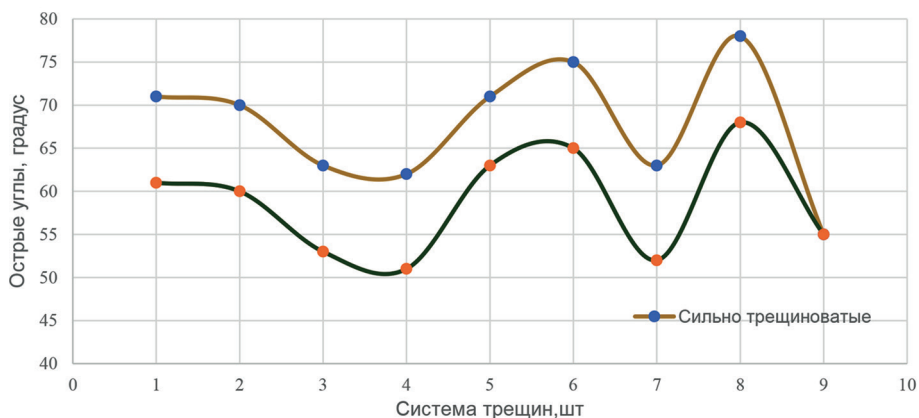


Рис. 8. Формирование острых углов трещин
Fig. 8. Formation of sharp corners of cracks

Разница азимутов первых главных тектонических направлений равна углу наклона ромбической грани кристалла кальцита: $62^\circ + 360^\circ - 320^\circ = 102^\circ \approx 101^\circ 55'1''$.

В недрах Земли осуществляется синергетика. Динамический хаос является одной из самых интересных и важных частей синергетики. В этом отношении зону пересечения структурных элементов системы трещин можно рассматривать как область динамического хаоса. Структурные части блоковых месторождений строительных горных пород чаще всего имеют форму параллелепипедов. Для этого берется опытный участок размером 10×10 м. На этом участке определяется вероятность блоков в зависимости от направления структурных частей, их размеров и формы, а также указывается направление развития горных работ. Для исследования данного участка была создана модель условий карьера в программе Rocscience.

Анализ полученной диаграммы позволяет выделить доминирующие системы трещиноватости. Данная программа позволила провести общую оценку геомеханического состояния массива данного карьера именно в зоне максимального трещиноватого участка (рис. 8). На основе этого распределения был проведен проверочный расчет на вероятность плоского скольжения.

Результаты кинематического анализа показали, что вероятность плоского обрушения (Planar Sliding) для наиболее неблагоприятной системы составляет 24,5%, при этом критический диапазон углов падения трещин, попадающих в зону риска, находится в пределах $45^\circ - 65^\circ$. Выделенная на рис. 9 критическая зона (crescent zone) охватывает 12% от общего числа замеров, что указывает на локальный, но статистически значимый риск структурной неустойчивости.

Если геометрическая форма структурного блока массива симметрична

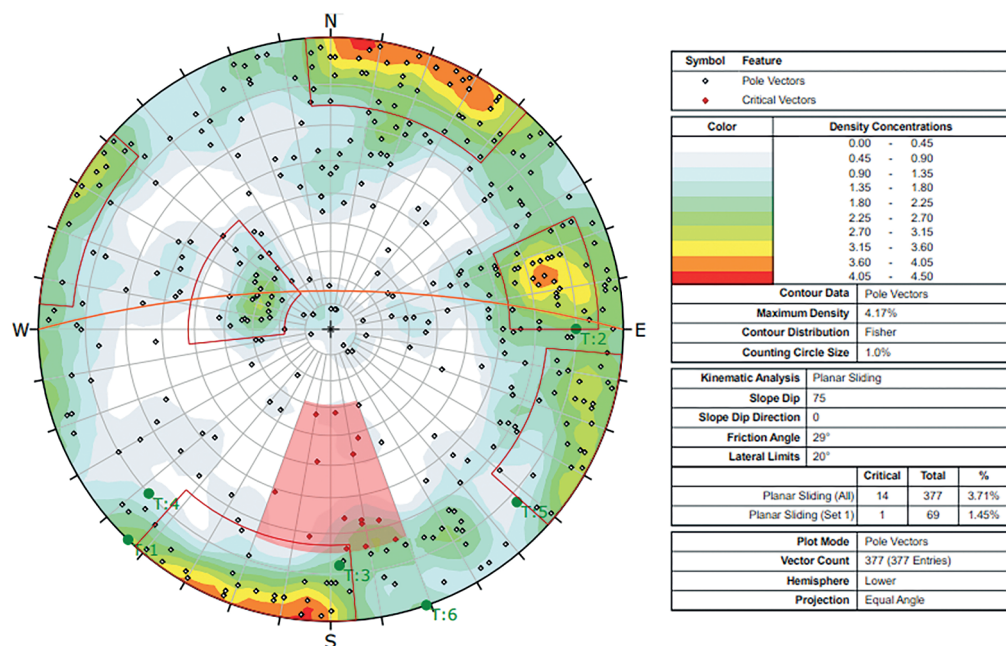


Рис. 9. Результаты статистической обработки ориентации систем трещин

Fig. 9. Statistical analysis results of joint system orientations

(прямоугольник, ромб), процесс моделирования систем трещин упрощается, так как оси этих фигур коррелируют с диаметрами деформационного эллипса. В общей плоскости деформационный эллипс вписывается в параллелограмм, при этом главные оси эллипса совпадают с направлениями действующих главных напряжений. Построение параллелограмма вокруг деформационного эллипса позволяет получить проектную модель структурного блока, ориентация элементов которого напрямую зависит от поля напряжений.

На основе данной модели и выявленных закономерностей трещиноватости было определено оптимальное направление развития горных работ на месторождении строительного камня. В ходе исследований была установлена прямая зависимость между ориентацией фронта работ и качеством добываемого сырья. Результаты статистической обработки данных о выходе кондиционных блоков при различных значениях истинного азимута направления разбивания представлены в табл. 4. Анализ данных показывает, что максимальный выход целых блоков ($m_k = 279$ шт.) достигается при азимуте 90° , что совпадает с направлением главных нормальных напряжений, определенных по эллипсу деформации.

Для сохранения природной целостности материала необходимо переходить к технологиям, учитывающим естественную структурную нарушенность массива месторождения и использующим механизмы направленного раскола. Для обеспечения высокой эффективности разработки в условиях неопределенности свойств массива предлагается следующий алгоритм. При наличии данных о геологическом строении параметры добычи адаптируются под существующую трещиноватость. В случае работы на слабоизученных участках необходи-

мо проведение оперативного экспресс-анализа физико-механических свойств.

В первую очередь следует определить лимитирующие показатели прочности на растяжение по главным осям анизотропии, что позволит установить границы устойчивости и обосновать параметры направленного разрушения. Геометрические параметры буровой сетки представлены на рис. 10. Основным расчетным показателем здесь выступает относительное расстояние между осями соседних шпуров L , которое выбирается исходя из диаметра d (у применяемого оборудования в данном исследовании $d = 80$ мм). Определение оптимального шага скважин для различных сортов

Таблица 4

Результаты исследовательских работ
Research results

Истинный азимут направления разбивания блоков (угла), A_k , град	Выход целых блоков, m_k , шт.	Истинный азимут направления разбивания блоков, A_k , град	Выход целых блоков, m_k , шт.
1	2	1	2
000	227	090	279
010	241	100	270
020	232	110	267
025	243	115	254
030	208	120	274
035	232	125	267
040	201	130	266
045	240	135	263
050	232	140	265
055	228	145	250
060	260	150	270
065	247	155	260
070	250	160	249
075	263	165	250
080	270	170	236
085	276	175	224
090	279	180	228

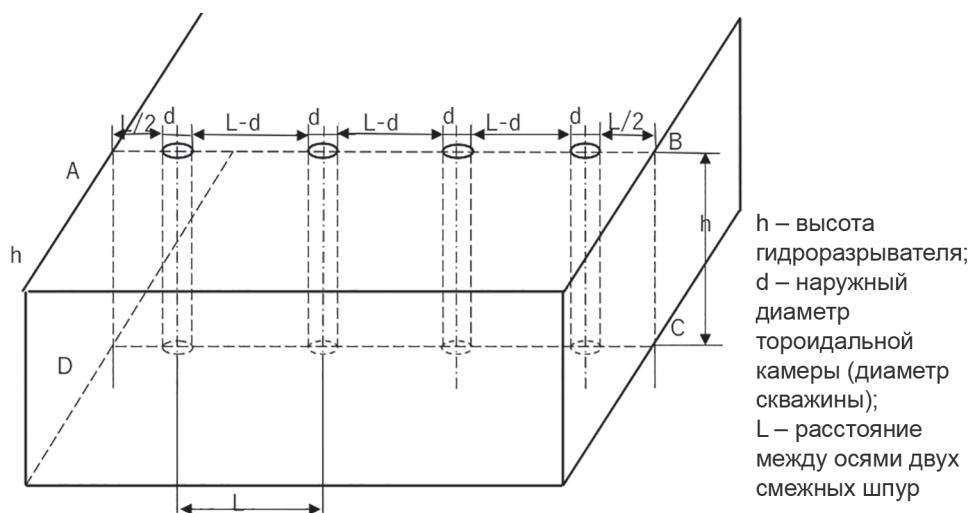


Рис. 10. Расположение скважин на поверхности ABCD для разрыва плиты строительного камня гидроразрывателем

Fig. 10. Location of holes on the ABCD surface for breaking a building stone slab with a hydraulic breaker

каменного материала производится на основе математического сопоставления распорного давления, генерируемого гидроразрывателем, и расчетного сопротивления породы растяжению. Необходимо рассчитать оптимальное расстояние между скважинами для различных сортов разрабатываемого каменного материала, используя давление, создаваемое в скважине с гидроразрывателем, и прочность на растяжение разрушенной породы.

Для достижения поставленной цели исследования было выполнено поэтапное компьютерное моделирование процесса взаимодействия скважин при механическом раскалывании. Этот процесс позволил обосновать оптимальные геометрические параметры расположения скважин с учетом физико-механических свойств и трещиноватости мраморизованных известняков.

Технология гидродинамического разрушения применяется как при обработке уже извлеченной горной массы, так и непосредственно в массиве горных пород с использованием системы па-

раллельно пробуренных скважин, расположенных с заданным шагом. Кроме того, разрушение может осуществляться через отверстия, сформированные с применением гидродинамических взрывателей. Предварительное определение прочностных характеристик пород, в частности предела прочности при одноосном сжатии, имеет ключевое значение для обоснования оптимальных параметров разработки. В первую очередь это касается выбора рационального расстояния между скважинами, а также расчета давления, создаваемого гидродинамическими взрывателями на стенки скважин.

На первом этапе моделирования была разработана базовая геометрическая схема. Для исследования был выбран представительный «блок» горного массива. На схеме (рис. 11, шаг 1) синим контуром обозначены границы расчетной области. Черными вертикальными линиями показаны четыре параллельные скважины, пробуренные в массиве. Ключевым исследуемым параметром на данном этапе является расстояние меж-

ду осями скважин L , обозначенное красным цветом. Первоначальная модель создает основу для последующего наложения конечно-элементной сетки и задания свойств материалов.

На втором этапе геометрическая модель была преобразована в расчетную конечно-элементную модель. Была сгенерирована нерегулярная треугольная сетка (mesh), покрывающая всю область исследования (рис. 11, шаг 2). Модель была разделена на несколько литологических слоев (выделены голубым, серым и оранжевым цветами), имитирующих неоднородность мраморизованных известняков. Зелеными линиями показаны плоскости ослабления или трещины, наклон которых моделирует естественную трещиноватость массива. В программу были введены реальные физико-механические свойства горных пород (модуль Юнга, коэффициент Пуассона,

сцепление, угол внутреннего трения), полученные в ходе лабораторных испытаний.

Третий этап посвящен анализу изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива вокруг скважин в процессе их последовательного разбуривания. На рис. 11, шаг 3 представлена цветовая карта распределения полей напряжений. Цветовая гамма (от синего к красному) отражает градиент изменения напряжений от минимальных к максимальным. Мониторинг НДС в этой фазе позволяет определить характер взаимодействия зон концентрации напряжений вокруг соседних скважин. Визуализация показывает, что зоны влияния скважин начинают перекрываться, создавая предпосылки для формирования единой трещины раскола. Этот анализ является основой для определения оптимального расстояния L , обеспечи-

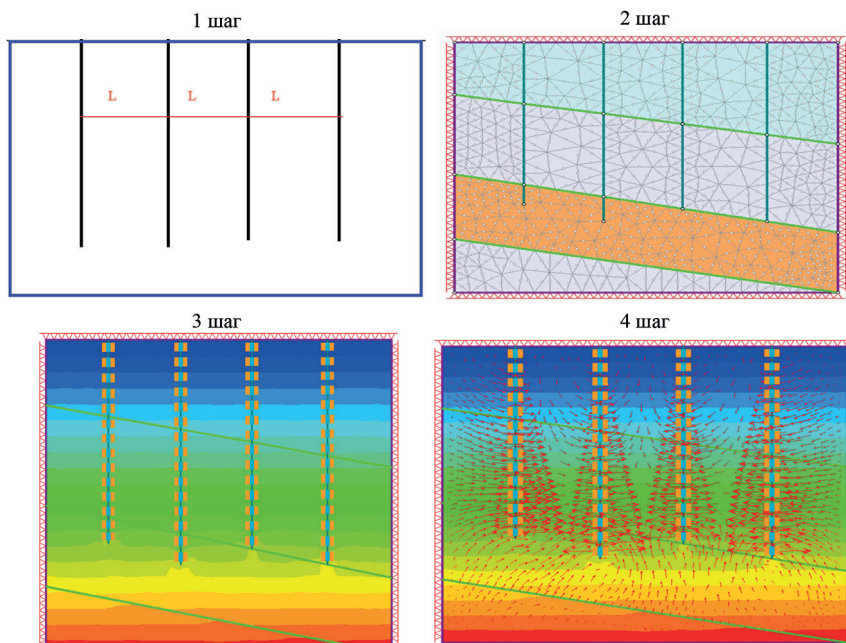


Рис. 11. Этапы численного моделирования взаимодействия скважин и развития зон разрушения при обосновании параметров раскалывания

Fig. 11. Stages of numerical modeling of borehole interaction and the development of fracture zones in substantiating splitting parameters

вающего эффективное взаимодействие скважин при минимальных энергетических затратах.

На завершающем, четвертом этапе моделирования (рис. 11, шаг 4) используются специальные возможности программного комплекса для прогнозирования направления развития трещин гидроразрыва (или механического раскалывания) с учетом заданной трещиноватости. На фоне полей напряжений красными стрелками показаны векторы максимальных главных напряжений и вероятные направления распространения трещин. Четко видно, что наличие наклонных плоскостей ослабления (зеленые линии) существенно корректирует траекторию развития трещин, заставляя их отклоняться от строго вертикального направления. Данный этап позволяет определить максимальные напряжения, необходимые для инициации разрыва, и подтверждает необходимость учета естественной трещиноватости при обосновании параметров раскалывания.

Комплексный анализ четырех этапов моделирования позволяет сделать следующие выводы для геомеханического обоснования. Экспериментальные ис-

следования прочностных свойств мраморизованных известняков показали, что предел прочности на одноосное сжатие (UCS) находится в широком диапазоне, преимущественно от 1 до 14 МПа, достигая 20 МПа для наиболее прочных разностей. Проведенное моделирование (рис. 11, шаг 4) доказывает, что для эффективного раскалывания пород с такой прочностью необходимо создавать в межскважинном пространстве напряжения, превышающие предел прочности на растяжение (который обычно в 10–15 раз меньше UCS). Оптимальное расстояние L должно выбираться таким образом, чтобы зоны концентрации растягивающих напряжений от соседних скважин надежно перекрывались. При этом траектория раскола будет неизбежно корректироваться существующей системой трещин, что требует увеличения прикладываемого усилия или корректировки азимута расположения скважин при интенсивной трещиноватости массива.

На рис. 12 представлена зависимость давления, создаваемого гидроразрывателем, от прочности крепких горных пород на растяжение. В отличие от тре-



Рис. 12. Давление в скважине в зависимости от прочности пород на растяжение

Fig. 12. Well pressure depending on rock tensile strength

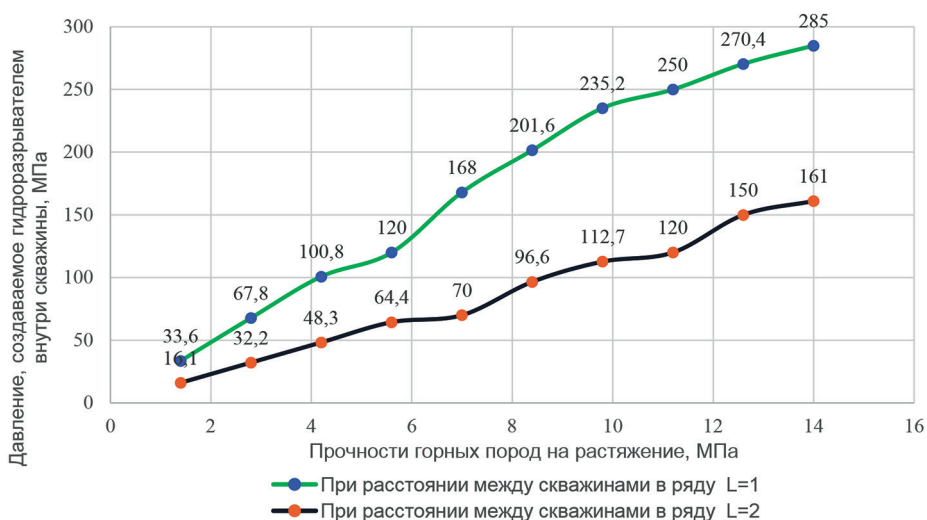


Рис. 13. Зависимость давления при различных расстояниях между скважинами

Fig. 13. Dependence of pressure on different borehole spacings

щитоватых массивов, в крепких породах наблюдается более строгое линейное возрастание требуемого давления во всем исследуемом диапазоне прочности (от 2 до 20 МПа).

Характерной особенностью данного графика является изменение влияния параметра расстояния между скважинами (L): в крепких породах наибольшие значения давления соответствуют схеме с увеличенным шагом ($L = 2$, красная линия). При максимальной рассматриваемой прочности породы в 20 МПа требуемое давление для $L = 2$ достигает существенной величины 480 МПа, что более чем в два раза превышает аналогичный показатель для схемы $L = 1$ (230 МПа).

Подобная динамика указывает на то, что в условиях крепких монолитных пород плотное расположение скважин ($L = 1$) способствует более эффективному снижению энергетического порога разрушения за счет взаимного влияния зон напряжений. Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости дифференцированного подхода к выбору сетки скважин в зависимости от кате-

гории крепости массива: если в трещиноватых породах увеличение L снижает нагрузку на оборудование, то в крепких породах, напротив, сближение скважин обеспечивает значительную экономию рабочего давления.

На графике (см. рис. 13) отображена функциональная зависимость величины давления, создаваемого гидроразрывателем внутри скважины, от прочности горных пород на растяжение в условиях трещиноватых массивов. Анализ графических данных позволяет выявить устойчивую закономерность: с ростом прочностных характеристик вмещающего массива наблюдается линейное увеличение необходимого давления инициирования разрыва. При этом характер данной зависимости существенно модулируется геометрическим параметром расположения скважин в ряду.

Сравнительный анализ кривых показывает, что при сокращении расстояния между скважинами ($L = 1$, зеленая линия) интенсивность роста давления значительно выше, чем при более разреженном их расположении ($L = 2$, синяя линия). В частности, для пород с пре-

делом прочности на растяжение свыше 10 МПа разрыв между требуемыми значениями давления становится наиболее выраженным: при $L = 1$ давление достигает значений 250–285 МПа, в то время как при $L = 2$ оно удерживается в диапазоне 120–160 МПа.

Заключение

На основе комплексного геомеханического исследования, сочетающего методы структурной геологии, аналитическое моделирование и численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), сформулированы научно-технические выводы, определяющие условия эффективного разрушения мраморизованных известняков. Установлено, что показатели природной блочности и рациональное направление развития добычных работ в значительной степени предопределяются пространственной ориентацией, плотностью и взаимным положением доминирующих систем трещин. Учет данных факторов на этапе проектирования позволяет не только прогнозировать качественные характеристики массива, но и существенно повышать выход кондиционной продукции за счет совмещения плоскостей технического раскола с естественными плоскостями ослабления.

Научная новизна работы заключается в установлении математических зависимостей между геометрическими параметрами трещиноватости массива и эффективностью отделения монолитных блоков. Выявленная линейная зависимость между величиной прецесси-

онного давления и пределом прочности пород на растяжение позволяет с высокой точностью определять необходимые распорные усилия. При этом графическая интерпретация результатов подтверждает, что энергоемкость процесса напрямую зависит от конфигурации буровой сетки: так, при увеличении относительного межсоевского расстояния с $L = 1$ до $L = 2$ требуемое давление снижается с 250 МПа до 100 МПа (для пород прочностью до 14 МПа). Это доказывает возможность эффективного управления процессом разрушения путем целенаправленного варьирования шага скважин в зависимости от их диаметра и прочности вмещающих пород.

Практическая значимость исследования подтверждается обоснованием применения скважинных гидроразрывателей с тороидальными упругими камерами. Данная технология обеспечивает формирование внутри шпуров направленного избыточного давления в диапазоне от 16,1 до 235,2 МПа, что достаточно для инициации и управляемого развития магистральной трещины без разрушения краевых зон блоков. Использование предложенных технологических режимов и рационального межсоевского расстояния L создает предпосылки для формирования устойчивого раскола с заданными параметрами.

В конечном итоге это позволяет оптимизировать добычу мраморизованных известняков, снизить нергоемкость горных работ и обеспечить максимальную сохранность целостности извлекаемого природного камня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекбергенов Д. К., Зейнуллин А. А., Джангулова Г. К., Жанакова Р. К., Бектибаев У. А. Обоснование подземной геотехнологии добычи месторождений со сложной морфологией: пример рудника Акжал // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. — № 12-2. — С. 33–70. DOI: 10.25018/0236-1493-2025-122-0-33.

2. Жанакова Р. К., Аталикова Н., Жангулова Г., Какымжанов Е., Курманбаев О. Отсоединение плит от однородной породы с использованием тороидальных гидроразрывных устройств в параллельных скважинах // Вестник КазУТБ. — 2025. — № 3. DOI: 10.58805/kazutb.v.3.28-992.
3. Almenov T. M., Moldabayev S. K., Zhanakova R. K., Askarova G. E., Dryhola M. A. Ensuring the stability of slopes and ledges at the Vasilkovsky quarry (Republic of Kazakhstan) // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2025, no. 6. DOI: 10.33271/nvngu/2025-6/043.
4. Hoek E., Brown E. T. The Hoek – Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 3, pp. 445 – 463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001.
5. Brady B. H. G., Brown E. T. Rock mechanics for underground mining. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2006, 628 p.
6. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of rock mechanics. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007, 488 p.
7. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications. New York: John Wiley & Sons, 1989, 272 p.
8. Palmström A. Rock engineering systems. London: CRC Press, 2009, 318 p.
9. Priest S. D. Discontinuity analysis for rock engineering. London: Chapman & Hall, 1993, 473 p.
10. Ulusay R., Hudson J. A. (Eds.). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974 – 2006. Ankara: ISRM, 2007, 628 p.
11. Wong L. N. Y., Deng J. Rock splitting mechanics and its applications in civil and mining engineering // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, no. 8, pp. 2865 – 2891. DOI: 10.1007/s00603-019-01752-x.
12. Mandaduri G., Berry P. Numerical modelling of rock splitting processes in dimension stone quarries // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 102, pp. 77 – 89. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.018.
13. Abdideh M., Behbahani S. S. Effect of geological discontinuities on the efficiency of hydraulic rock splitters // Journal of Mining and Environment. 2021, vol. 12, no. 2, pp. 493 – 507. DOI: 10.22044/jme.2021.10657.2020.
14. Careddu N., Dino G. A. Dimension stone quarrying: technical and economic aspects of diamond wire and expansive mortar applications // Resources Policy. 2020, vol. 68, article 101715. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101715.
15. El-Shayeb Y., Helal M. A new approach for evaluation of block recovery in marble and limestone quarries // Arabian Journal of Geosciences. 2019, vol. 12, article 633. DOI: 10.1007/s12517-019-4505-1.
16. Akcakoca H. Determination of optimum wedge and feather spacing in rock splitting // Journal of African Earth Sciences. 2020, vol. 162, article 103723. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103723.
17. Yarahmadi R., Bagherpour R. Safety and productivity optimization in dimension stone quarrying methods // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2022, vol. 56, no. 1, pp. 53 – 66. DOI: 10.22059/ijmge.2021.317523.594892.
18. Ozelik Y., Kulaksiz S. Development of a new rock mass classification system for dimension stone quarrying // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 657 – 676. DOI: 10.1080/17480930.2020.1834193.
19. Deng J., Wong L. N. Y. Numerical investigation of fracture inclination effects on rock splitting // Computers and Geotechnics. 2020, vol. 120, article 103407. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103407.
20. Sousa L. M. Influence of microstructural features on the mechanical properties of natural building stones // Geological Society, London, Special Publications. 2022, vol. 515. DOI: 10.1144/SP515-2020-213.
21. Goodman R. E. Introduction to Rock Mechanics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989, 562 p.
22. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek – Brown failure criterion – 2002 edition // Proceedings of NARMS-TAC Conference. Toronto, Canada. 2002, vol. 1, pp. 267 – 273.
23. Сарыбаев М. А. Повышение эффективности добычи строительного камня с использованием гидравлических раскалывателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Алматы, 2010. — 32 с. **ГЛАС**

REFERENCES

1. Bekbergenov D., Zeinullin A., Jangulova G., Zhanakova R., Bektibayev U. Substantiation of geo-technology for complex-morphology mineral deposits: A case-study of the Akzhal Mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 12-2, pp. 33–70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2025-122-0-33.
2. Zhanakova R. K., Atalikova N., Zhangulova G., Kakymzhanov E., Kurmanbayev O. Separation of slabs from homogeneous rock using toroidal hydraulic fracturing devices in parallel boreholes. *Vestnik KazUTB.* 2025, no. 3. DOI: 10.58805/kazutb.v.3.28-992.
3. Almenov T. M., Moldabayev S. K., Zhanakova R. K., Askarova G. E., Dryhola M. A. Ensuring the stability of slopes and ledges at the Vasilkovsky quarry (Republic of Kazakhstan). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* 2025, no. 6. DOI: 10.33271/nvngu/2025-6/043.
4. Hoek E., Brown E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2019, vol. 11, no. 3, pp. 445–463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001.
5. Brady B. H. G., Brown E. T. *Rock mechanics for underground mining.* 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2006, 628 p.
6. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of rock mechanics.* 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007, 488 p.
7. Bieniawski Z. T. *Engineering rock mass classifications.* New York: John Wiley & Sons, 1989, 272 p.
8. Palmström A. *Rock engineering systems.* London: CRC Press, 2009, 318 p.
9. Priest S. D. *Discontinuity analysis for rock engineering.* London: Chapman & Hall, 1993, 473 p.
10. Ulusay R., Hudson J. A. (Eds.). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006.* Ankara: ISRM, 2007, 628 p.
11. Wong L. N. Y., Deng J. Rock splitting mechanics and its applications in civil and mining engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2019, vol. 52, no. 8, pp. 2865–2891. DOI: 10.1007/s00603-019-01752-x.
12. Mandaduri G., Berry P. Numerical modelling of rock splitting processes in dimension stone quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2018, vol. 102, pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.018.
13. Abdideh M., Behbahani S. S. Effect of geological discontinuities on the efficiency of hydraulic rock splitters. *Journal of Mining and Environment.* 2021, vol. 12, no. 2, pp. 493–507. DOI: 10.22044/jme.2021.10657.2020.
14. Careddu N., Dino G. A. Dimension stone quarrying: technical and economic aspects of diamond wire and expansive mortar applications. *Resources Policy.* 2020, vol. 68, article 101715. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101715.
15. El-Shayeb Y., Helal M. A new approach for evaluation of block recovery in marble and limestone quarries. *Arabian Journal of Geosciences.* 2019, vol. 12, article 633. DOI: 10.1007/s12517-019-4505-1.
16. Akcakoca H. Determination of optimum wedge and feather spacing in rock splitting. *Journal of African Earth Sciences.* 2020, vol. 162, article 103723. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103723.
17. Yarahmadi R., Bagherpour R. Safety and productivity optimization in dimension stone quarrying methods. *International Journal of Mining and Geo-Engineering.* 2022, vol. 56, no. 1, pp. 53–66. DOI: 10.22059/ijmge.2021.317523.594892.
18. Ozelik Y., Kulaksiz S. Development of a new rock mass classification system for dimension stone quarrying. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment.* 2021, vol. 35, no. 9, pp. 657–676. DOI: 10.1080/17480930.2020.1834193.
19. Deng J., Wong L. N. Y. Numerical investigation of fracture inclination effects on rock splitting. *Computers and Geotechnics.* 2020, vol. 120, article 103407. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103407.
20. Sousa L. M. *Influence of microstructural features on the mechanical properties of natural building stones.* Geological Society, London, Special Publications. 2022, vol. 515. DOI: 10.1144/SP515-2020-213.
21. Goodman R. E. *Introduction to Rock Mechanics.* 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989, 562 p.
22. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition. *Proceedings of NARMS-TAC Conference.* Toronto, Canada. 2002, vol. 1, pp. 267–273.

23. Sarybaev M. A. *Povyshenie effektivnosti dobychi stroitel'nogo kamnya s ispol'zovaniem gidravlicheskih raskalyvateley* [Improving the efficiency of building stone extraction using hydraulic splitters], Candidate's thesis, Almaty, 2010, 32 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сарыбаев Мадияр Абдуллаевич — канд. техн. наук,
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан, e-mail: sarybaev.m@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4488-5659,

Жанакова Раиса Кульмахановна¹ — PhD,
ассоциированный профессор, e-mail: zhanakovaraisa@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0845-8449,

Алменов Талгат Макулбекович¹ — канд. техн. наук,
профессор, e-mail: almen_t@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9674-8598,

Шаутинов Мелс Рахимович¹ — канд. техн. наук,
профессор, e-mail: m.shautenov@satbayev.university,
ORCID ID: 0000-0002-0266-3882,

Асылханова Самал Асылхановна¹ — магистр технических наук,
докторант, e-mail: s.assylkhanova@satbayev.university,
ORCID ID: 0000-0003-2385-161X,

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.

Для контактов: Жанакова Р.К., e-mail: zhanakovaraisa@mail.ru,
Алменов Т.М., e-mail: almen_t@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Sarybaev, Cand. Sci. (Eng.),
Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan, e-mail: sarybaev.m@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4488-5659,

R.K. Zhanakova¹, PhD, Associate Professor,
e-mail: zhanakovaraisa@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0845-8449,

T.M. Almenov¹, Cand. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: almen_t@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9674-8598,

M.R. Shautenov¹, Cand. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: m.shautenov@satbayev.university,
ORCID ID: 0000-0002-0266-3882,

S.A. Assylkhanova¹, Master of Technical Sciences,
Doctoral Student, e-mail: s.assylkhanova@satbayev.university,
ORCID ID: 0000-0003-2385-161X,

¹ Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva,
Almaty, Kazakhstan.

Corresponding author: R.K. Zhanakova, e-mail: zhanakovaraisa@mail.ru,
T.M. Almenov, e-mail: almen_t@mail.ru.

Получена редакцией 09.02.2026, получена после рецензии 29.03.2026, принята к печати 10.10.2026.
Received by the editors 09.02.2026, received after the review 29.03.2026, accepted for printing 10.10.2026.