

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕПЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ШТРЕКА НА ШАХТАХ СО СЛОЖНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ

Д.К. Бекбергенов¹, А. Зейнуллин², Г.К. Джангулова³, Р.К. Жанакова⁴, У.А. Бектибаев¹

¹ Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Алматы, Казахстан

² Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулжанова, Астана, Казахстан

³ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁴ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: r.zhanakova@satbayev.university

Аннотация: Актуальность исследования заключается в необходимости обоснования конструктивных параметров крепления транспортного штрека в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях шахты Акжал. Оптимизация системы крепления – это важнейший фактор обеспечения устойчивости выработок, безопасности горных работ и предотвращения деформаций и обрушений горных пород при эксплуатации подземных выработок. Цель исследования – разработка геомеханического обоснования выбора оптимальных конструктивных параметров крепления транспортного штрека с учетом напряженно-деформированного состояния массива горных пород и особенностей геологического строения месторождения Акжал. Особое внимание уделено анализу устойчивости породного массива и его поведению под воздействием горного давления в процессе проведения и эксплуатации штрека. Использовались методы геомеханического анализа, включающие оценку прочности и устойчивости массива горных пород, определение коэффициента структурного ослабления, модуля деформации массива по степени трещиноватости и коэффициенту устойчивости, а также аналитическую функциональную зависимость геоструктурных факторов, влияющих на состояние крепи и стенок выработки. Результаты исследования позволили классифицировать породы по категориям устойчивости и предложить рациональные конструктивные параметры крепления, обеспечивающие надежную и безопасную эксплуатацию транспортного штрека в условиях шахты Акжал. Разработанные рекомендации направлены на повышение устойчивости горных выработок, снижение рисков деформаций и увеличение срока их службы. Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе к прогнозированию поведения породного массива и обоснованию параметров крепления с учетом геомеханических и структурных особенностей месторождения, что позволяет повысить безопасность и эффективность подземных горных работ в сложных геологических условиях шахты Акжал.

Ключевые слова: подземная добыча месторождений полезных ископаемых, морфология месторождения, геологическое строение, крепление выработок, транспортный штрек, шахта Акжал, геомеханическое обоснование, устойчивость породного массива.

Благодарность: Исследования проведены в рамках грантового финансирования Министрства науки и высшего образования Республики Казахстан для реализации научно-исследовательских задач по календарному плану на 2024–2026 годы ИГД им. Д.А. Кунаева по теме НИР (ГФ 24-26, ИРН АР 23488767) – «Разработка и обоснование эффективных систем обработки рудных залежей сложной морфологии».

Для цитирования: Бекбергенов Д. К., Зейнуллин А., Джангулова Г. К., Жанакова Р. К., Бектибаев У. А. Обоснование конструктивных параметров крепления транспортного штрека на шахтах со сложной морфологией // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 159–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_159.

Justification of structural parameters for transport drift support in mines with complex morphology

D. Bekbergenov¹, A. Zeinullin², G. Jangulova³, R. Zhanakova⁴, U. Bektibayev¹

¹ D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan

² K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan

³ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

⁴ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: r.zhanakova@satbayev.university

Abstract: The significance of this study is determined by the necessity to substantiate the structural parameters of the transport drift support system operating under the complex mining and geological conditions of the Akzhal mine. Optimization of the support system is a key factor in ensuring the stability of mine workings, the safety of mining operations, and the prevention of rock mass deformations and collapses during underground exploitation. The aim of the study is to develop a geomechanical rationale for selecting the optimal structural parameters of the transport drift support, taking into account the stress-strain state of the rock mass and the geological features of the Akzhal deposit. Particular attention is paid to the analysis of rock mass stability and its behavior under the influence of mining-induced stresses during the excavation and operation of the drift. The study employed methods of geomechanical analysis, including assessment of rock mass strength and stability, determination of the structural weakening coefficient, deformation modulus based on jointing degree, and stability coefficient, as well as analytical functional relationships between geostructural factors affecting the condition of the support and drift walls. The results made it possible to classify the rocks by stability categories and propose rational structural parameters of the support that ensure reliable and safe operation of the transport drift under the conditions of the Akzhal mine. The developed recommendations are aimed at improving the stability of mine workings, reducing deformation risks, and extending their service life. The scientific novelty of the research lies in the comprehensive approach to predicting the behavior of the rock mass and justifying support parameters considering the geomechanical and structural characteristics of the deposit, which enhances the safety and efficiency of underground mining operations in the complex geological conditions of the Akzhal mine.

Key words: underground mining of mineral deposits, deposit morphology, geological structure, mine support, transport drift, Akzhal mine, geomechanical justification, rock mass stability.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of grant funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for the implementation of research tasks according to the calendar plan for 2024-2026 of the D.A. Kunaev Institute of Applied Sciences on the research topic (GF 24-26, IRN AR 23488767) - «Development and justification of effective systems for mining ore deposits of complex morphology».

For citation: Bekbergenov D., Zeinullin A., Jangulova G., Zhanakova R., Bektibayev U. Justification of structural parameters for transport drift support in mines with complex morphology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):159-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_159.

Введение

Современный уровень знаний о геомеханических процессах, происходящих в массиве горных пород при подземной разработке месторождений, имеет ключевое значение при обосновании конструктивных параметров крепления транспортных выработок, чем и вызвана необходимость рассмотрения конструктивных параметров крепления транспортного штрека шахты Акжал, представляющей типичный пример месторождения со сложной морфологией и характеризующейся переменной мощностью, прерывистым оруденением, а также изменяющимися параметрами по падению и по простиранию рудных тел. Применение методов теории надежности, вероятностного анализа и геометризации недр позволяет проводить точные расчеты напряженно-деформированного состояния массива, оценивать устойчивость горных выработок и прогнозировать возможные деформационные проявления, что необходимо для выбора оптимальной конструкции и параметров крепи [1].

Подземная добыча полезных ископаемых неизбежно вызывает развитие в недрах геомеханических процессов, сопровождающихся изменением напряженного состояния, деформацией и разрушением горных пород. Эти процессы при недостаточном инженерном контроле могут привести к неблагоприятным технологическим последствиям — обрушениям, деформациям, прорывам воды, внезапным выбросам. В условиях шахты Акжал, где рудные тела имеют сложную морфологию [2] и переменные углы падения, такие проявления особенно вероятны, что требует научно обоснованного подхода к проектированию систем крепления [3].

Характерные особенности и разнообразность горно-геологических условий со сложной морфологией представ-

ляют рудные тела в формах линзообразной, жильной, пластообразной, штокерковые, гнездообразные, штокообразные и другие массивные конфигурации, сконцентрированные в одном рудном поле по простиранию и падению рудных залежей.

В последние годы при разработке глубоких рудных месторождений, в том числе на шахте Акжал, регистрируются сложные геодинамические условия, что проявляется в росте напряжений в массиве, деформациях и локальных обрушениях кровли. Увеличение глубины ведения горных работ и расширение системы подземных выработок приводят к возникновению опасных динамических проявлений горного давления, включая сейсмические толчки и проявления техногенной сейсмичности, что существенно повышает риск аварий и снижает безопасность труда.

Масштаб и интенсивность горных работ на месторождении Акжал обуславливают необходимость постоянного мониторинга геомеханических процессов, происходящих в породном массиве. Контроль за состоянием массива и проявлениями горного давления (смещениями, микротрещинообразованием, изменением напряженности) позволяет своевременно корректировать параметры крепления и предотвращать потерю устойчивости транспортных выработок [4].

Геомеханическое состояние породного массива представляет собой совокупность показателей, характеризующих его деформируемость, прочность и устойчивость при действии горного давления и техногенных нагрузок. В шахте Акжал количественные проявления этих процессов зависят не только от природных факторов (структуры, трещиноватости, литологии пород), но и от геотехнологии ведения подземных работ — системы поэтажного обруше-

ния, глубины залегания и конфигурации рудных тел.

Технология ведения горных работ определяет характер напряженно-деформированного состояния массива, а следовательно, и требования к конструкции крепления транспортного штрека. Геомеханические процессы, возникающие в результате технологического воздействия, должны рассматриваться как следствие выбранной системы разработки, что делает их учет при обосновании конструктивных параметров крепи неотъемлемой частью обеспечения безопасности и устойчивости выработок в горнотехнических условиях шахты Акжал и в соответствии с планом горных работ на разработку месторождения Акжал.

Геомеханические процессы проявляются в широком диапазоне горно-геологических условий — в капитальных, подготовительных и очистных выработках — и различаются по интенсивности и характеру протекания. Так как первопричиной этих процессов является взаимодействие горных пород под воздействием горных работ, то изменение технологии или технологических параметров ведения добычи непосредственно влияет на механическое состояние окружающего массива. Следовательно, управлять геомеханическими процессами возможно путем оптимизации технологии разработки и параметров горных выработок, представленных в проекте промышленной разработки запасов месторождения Акжал подземным способом.

Контроль и регулирование поведения породного массива при принятой системе разработки требуют комплексного анализа его физико-механических свойств и структурных особенностей, включая геологические, геоструктурные и геотехнические характеристики, а также закономерности формирования и проявления горного давления в процессе

подземной отработки рудных тел. В условиях шахты Акжал данная задача имеет особую значимость, поскольку рудные тела отличаются сложной геометрией и переменными углами падения, что приводит к неравномерному распределению напряжений в массиве и предъявляет повышенные требования к устойчивости и надежности крепления транспортных штреков.

Правильный выбор технологии подземной разработки и конструктивных параметров крепления, основанный на исследовании геомеханических процессов, обеспечивает эффективное и безопасное освоение запасов месторождения. В условиях шахты Акжал это позволяет повысить устойчивость транспортного штрека, снизить риски деформаций и аварийных ситуаций, а также увеличить срок службы выработок при оптимальном расходе материалов на крепление.

Выбор параметров крепления осуществляется на основе численного моделирования устойчивости породного массива при различных схемах расположения камер с учетом влияния тектонического нарушения с углами падения $57 - 71^\circ$. При этом анализировались такие показатели, как устойчивость массива, структура пород, геометрия рудных тел, а также возможные потери и разубоживание руды [5].

Многие исследователи уделяют значительное внимание обоснованию выбора рациональных систем подземной разработки рудных залежей в сложных горно-геологических условиях [6]. Особое место в современных научных работах занимает расчет модели геомеханических процессов, возникающих при ведении горных работ, что имеет решающее значение для обеспечения устойчивости выработок и безопасности горного производства.

В рамках данного направления проведено широкое исследование, охватывающее широкий спектр исследований,

направленный на разработку методов оценки устойчивости породных массивов, прогнозирования деформаций, а также анализа влияния горнотехнических факторов на напряженно-деформированное состояние массива и окружающую среду.

Результаты международных и отечественных исследований в этой области [7] легли в основу комплексного подхода, использованного при обосновании конструктивных параметров крепления транспортного штрека в горнотехнических условиях шахты Акжал.

Обзор литературы

В контексте обоснования конструктивных параметров крепления транспортного штрека в горно-геологических и горнотехнических условиях шахты Акжал особое значение имеют исследования, посвященные анализу геомеханических процессов, влияющих на устойчивость горных выработок. Результаты подобных исследований служат основой для принятия инженерных решений по обеспечению устойчивости и безопасности подземных сооружений.

Горные породы обладают изменчивыми физико-механическими свойствами, что при недостаточном учете геологических и структурных факторов может приводить к деформациям и обрушениям породного массива [8–10]. В работах Макарова и соавтора [11] рассматривались подходы к анализу напряженно-деформированного состояния горных пород вблизи одиночных выработок и зон влияния горных консолей, что имеет непосредственное отношение к проблемам устойчивости транспортных выработок.

Международный опыт показал, что устойчивость горных сооружений во многом зависит от морфологических особенностей массива и характера внешних воздействий, включая сейсмические.

Эти исследования позволили определить предельные значения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от геодинамических факторов [12].

В условиях шахты Акжал аналогичные закономерности проявляются под влиянием сложного геолого-морфологического строения рудных залежей, тектонических нарушений и вариаций напряженного состояния массива. Поэтому в рамках настоящего исследования особое внимание уделено анализу геомеханических и морфологических особенностей горного массива для выбора рациональных конструктивных параметров крепления транспортного штрека, обеспечивающих его устойчивость и безопасность эксплуатации [13].

В связи с увеличением глубины горных работ в настоящее время возникают значительные трудности, связанные с обеспечением безопасного и устойчивого функционирования рудников, поскольку геомеханические условия разработки существенно усложняются. Расчет устойчивости на больших глубинах предполагает численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива с учетом влияния постоянно действующих техногенных и тектонических напряжений, нередко превышающих предел прочности пород. В ряде исследований рассмотрены особенности проявления геомеханических процессов в сложноструктурных рудных массивах, а также методы поддержания устойчивости при ведении горных работ.

В исследованиях [14, 15] отмечается, что эффективное управление горным давлением и обеспечение устойчивости выработок требуют комплексного подхода, включающего учет тектонических нарушений, закономерностей перераспределения напряжений и геомеханических характеристик пород.

С учетом специфики шахты Акжал выбор и обоснование конструктивных

параметров крепления транспортного штрека направлены на минимизацию влияния динамических нагрузок, предотвращение деформаций и обеспечение стабильности породного массива в условиях сложной геодинамической обстановки [16].

Инновационные подходы в горнодобывающей отрасли играют ключевую роль в решении задач повышения эффективности и безопасности подземных работ, особенно при разработке месторождений со сложными геолого-техническими условиями, таких как шахта Акжал. Использование современных инженерных, геотехнологических и организационных инноваций позволяет оптимизировать конструктивные параметры крепления, повысить устойчивость выработок и снизить риски деформаций и аварийных ситуаций.

Как отмечается в ряде исследований [17–19], внедрение инновационных решений требует системного подхода, включающего три этапа — идентификацию проблемных зон, разработку и апробацию технологических решений, а также их интеграцию в производственные процессы. Применительно к шахте Акжал этот подход способствует обоснованию эффективных конструктивных параметров крепления транспортного штрека с учетом геомеханических особенностей массива, что обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации горных выработок.

В исследованиях ряда авторов отмечается, что анализ и моделирование геомеханических процессов является одним из ключевых этапов инженерно-геологических исследований, поскольку полученные результаты напрямую влияют на выбор рациональных решений при подземной разработке месторождений [20, 21]. Природные горные породы характеризуются высокой изменчивостью физических и механиче-

ских свойств, что при недостаточном учете геологических и структурных факторов может привести к деформациям, обрушениям и снижению устойчивости выработок.

Отработка рудных залежей шахты Акжал подземным способом сопровождается сложными геомеханическими процессами, обусловленными спецификой строения массива и горно-геологическими условиями. Проведенный анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что при подземной добыче полиметаллических руд особое значение имеет исследование конструктивных параметров крепления транспортного штрека в горнотехнических условиях.

В работах авторов [22–24] в современных условиях одними из приоритетных направлений исследований являются:

- изучение особенностей формирования и развития геомеханических процессов при ведении очистных и подготовительных работ;
- оценка характера проявления горного давления на элементы подземных сооружений, в том числе на транспортные штреки;
- анализ вероятности деформаций и обрушений пород кровли при образовании больших выработанных пространств;
- научное обоснование конструктивных и технологических параметров крепи транспортных выработок для обеспечения их устойчивости и безопасности эксплуатации в условиях изменяющегося напряженного состояния массива.

Такой подход обеспечит надежность горных выработок, повысит эффективность подземной добычи и минимизирует риски техногенных деформаций [25].

Завершение отработки шахты Акжал планируется в 2036 г. Проведение исследований в данном направлении способ-

ствует развитию научно-технического потенциала и расширению прикладных научных разработок в области горного инжиниринга, направленных на повышение эффективности и безопасности подземных горных работ.

Особое значение имеет разработка и обоснование конструктивных параметров крепления транспортных выработок, обеспечивающих их устойчивость и долговечность в сложных горно-геологических условиях. Исследование направлено на совершенствование геомеханических и технологических подходов к проектированию крепи, а также на определение оптимальных параметров

систем поддержания, учитывающих напряженно-деформированное состояние массива и особенности морфологии рудных залежей.

Результаты исследований позволят разработать методику по выбору и обоснованию конструктивных решений для транспортных штреков в условиях изменяющегося горного давления, что обеспечит повышение надежности подземных сооружений и устойчивость выработок при эксплуатации.

Обоснование параметров крепления транспортных выработок в горнотехнических условиях шахты Акжал является важным этапом в формировании эффек-

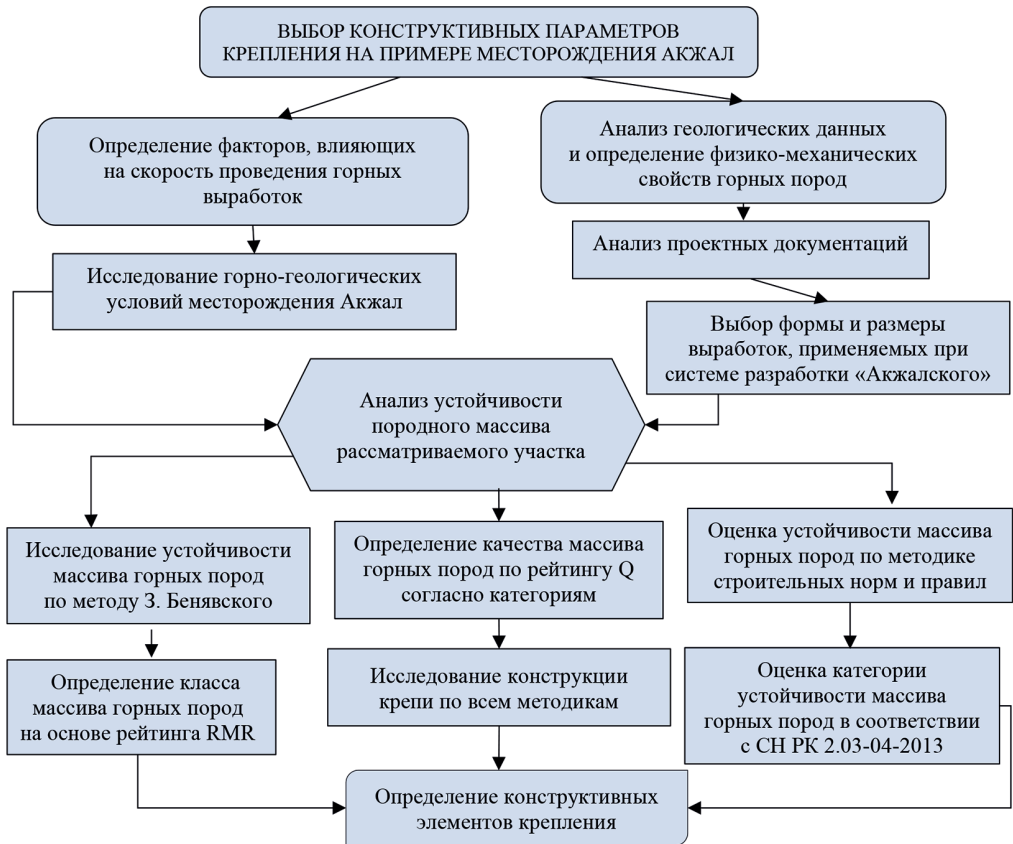


Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора типа крепи горных выработок по исследуемой методике в условиях Акжалского месторождения

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for selecting the type of mine working support according to the proposed methodology under the conditions of the Akzhal deposit

тивной и безопасной системы ведения горных работ, применимой для аналогичных месторождений Казахстана со сложной морфологией рудных тел.

Методы исследований

Для обоснования выбора типа крепи горных выработок в условиях Акжалского месторождения была разработана последовательная методика, представленная на рис. 1. Алгоритм включает комплекс процедур по анализу горно-геологических условий, оценке устойчивости массива горных пород и определению оптимальных конструктивных параметров крепления.

На первом этапе проводится анализ исходной информации: определяются факторы, влияющие на скорость проведения горных выработок, исследуются горно-геологические условия месторождения, а также выполняется анализ геологических данных и проектной документации с целью определения физико-механических свойств пород.

Далее осуществляется оценка устойчивости массива горных пород исследуемого участка с применением нескольких признанных методик классификации:

- метод З. Беньявского для определения устойчивости массива по структурным и геомеханическим признакам;
- система RMR (Rock Mass Rating) для количественной оценки качества массива по классам;
- система Q для классификации массива по категориям устойчивости;
- методика строительных норм и правил (СН РК 2.03-04-2013) для установления категории устойчивости массива в соответствии с национальными нормативами.

На заключительном этапе проводится сравнительное исследование конструкций крепи по всем рассмотренным методикам, что позволяет определить

конструктивные параметры крепления, соответствующие геомеханическим условиям конкретного участка. Представленный алгоритм обеспечивает научно обоснованный выбор типа крепи на основе комплексной оценки состояния массива горных пород и результатов анализа по нескольким независимым системам классификации.

Объект и особенности условий исследования

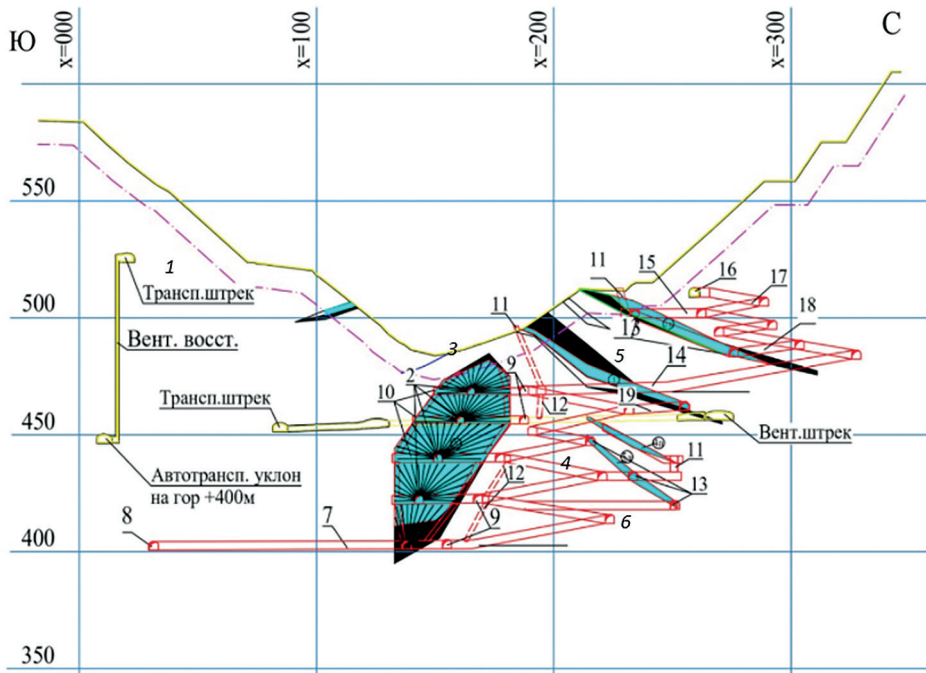
Обоснование поперечного сечения горных выработок

Исходя из рекомендуемой системы разработки на Восточном участке месторождения Акжал, первый этап включает выполнение комплекса горно-подготовительных работ. На данном этапе производится проходка транспортного штрека горизонта +450 м, который служит основным элементом транспортной и вентиляционной системы. Далее, до рудного тела № 5, по центру рудной залежи вдоль простирания осуществляется проходка бурового рудного штрека на том же горизонте до достижения конечной границы контура рудного тела.

Анализ ранее выполненных исследований показал [26], что для выбора конструкции крепи принимается предел прочности на сжатие 76 МПа, средняя плотность вмещающих пород 2,74 г/см³, объемная масса 2,69 г/см³.

Технологическая схема отработки залежей на руднике Акжал системой разработки поэтажными штреками с применением самоходного оборудования рекомендована Институтом горного дела им. Д.А. Кунаева и приведена на рис. 2.

С учетом используемого оборудования и требований нормативно-регламентирующих документов, форма и размеры поперечного сечения выработок определяются в соответствии с документами «Требования промышленной



- 1 – транспортный штрек; 2 – подэтажные штреки; 3 – разведочные орты;
 4 – подходной штрек к первому подэтажному штреку; 5 – отрезные восстающие;
 6 – отрезной штрек; 7 – транспортный штрек горизонта; 8 – автотранспортный уклон
 9 – доставочные штреки; 10 – погрузочные орты; 11 – вентиляционные восстающие;
 12 – рудоспуски; 13 – эксплуатационно-разведочные штреки; 14, 15, 18, 19 – подходные штреки;
 16 – вентиляционный штрек; 17 – транспортный уклон

Рис. 2. Система разработки подэтажными штреками с применением самоходного оборудования
 Fig. 2. Sublevel development system using self-propelled equipment

безопасности при ведении работ подземным способом» и «Инструкция по безопасному применению самоходного (нерельсового) оборудования в подземных рудниках».

При этом размеры сечений выработок назначаются с учетом предельных смещений крепи в период эксплуатации

в соответствии с положениями СНиП II-94-80 «Подземные горные выработки».

В соответствии с данными первичного проекта основные параметры, используемые для расчета крепи горизонтальных выработок, остаются без изменений (рис. 3 и табл. 1).

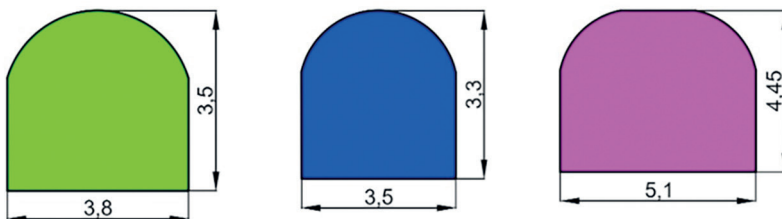


Рис. 3. Типы поперечного сечения подземных выработок
 Fig. 3. Types of cross-sectional shapes of mine workings

Таблица 1

**Основные виды и размеры выработок,
применяемые в горной системе месторождения Акжал**
Main types and dimensions of mine workings used in the mining system of the Akzhal deposit

№ п/п	Наименование выработки	Сечение, м ²	Ширина, м	Высота, м	Формы поперечного сечения горных выработок
1	Транспортный штрек гор +450 м	12,5	3,8	3,5	прямоугольно-сводчатая форма
2	Транспортный штрек гор +400 м	12,5	3,8	3,5	прямоугольно-сводчатая форма
3	Транспортный уклон от подэтажного № 1 до гор +400 м	12,5	3,8	3,5	прямоугольно-сводчатая форма
4	Переходы уклон	12,5	3,8	3,5	прямоугольно-сводчатая форма
5	Доставочный штрек	12,5	3,8	3,5	прямоугольно-сводчатая форма
6	Погрузочные орты	10,8	3,5	3,3	прямоугольно-сводчатая форма
7	Транспортный штрек	20,9	5,1	4,45	прямоугольно-сводчатая форма
8	Буровые подэтажные штреки	10,8	3,5	3,3	прямоугольно-сводчатая форма

Оценка устойчивости массива горных пород по эмпирическому методу Н. Бартон (Q) и З. Бенявского (рейтинговая система RMR)

По эмпирическому методу Бартон (Q-индекс) оценивается влияние прочностных качеств пород, глубины разработки, сечения выработок и напряжен-

ное состояние в окружающем массиве, количество и состояние трещин, в том числе степень их изменчивости. Бартон и соавторы предполагали, что максимальное давление на крепь может достигать значения, в 1,7 раза превышающего давление при временной поддержке [27].

Таблица 2

Рекомендации по выбору крепи в зависимости от категории устойчивости по Q-индексу
Recommendations for support selection based on stability category according to the Q-index

Q-индекс	Выбор типа крепи
40–100	проходка и поддержание выработок осуществляется без крепления
10–40	проходка выработок без крепи; на участках повышенной трещиноватости пород применять анкерную или набрызг-бетонную крепь; в породах, склонных к выветриванию, возводить набрызг-бетонную крепь
4–10	применять анкерную крепь, а в сильно трещиноватых породах, склонных к выветриванию — комбинированную крепь из анкеров и торкрет-фибробетона с металлической сеткой или без нее
1–4	торкрет-фибробетонная крепь в сочетании с анкерами, металлическая рамная крепь
0,001–1	проходку выработок вести с установкой временной опережающей забивной крепи; для постоянного поддержания выработок применять арочную металлическую крепь из тяжелого спецпрофиля, армокаркасные конструкции

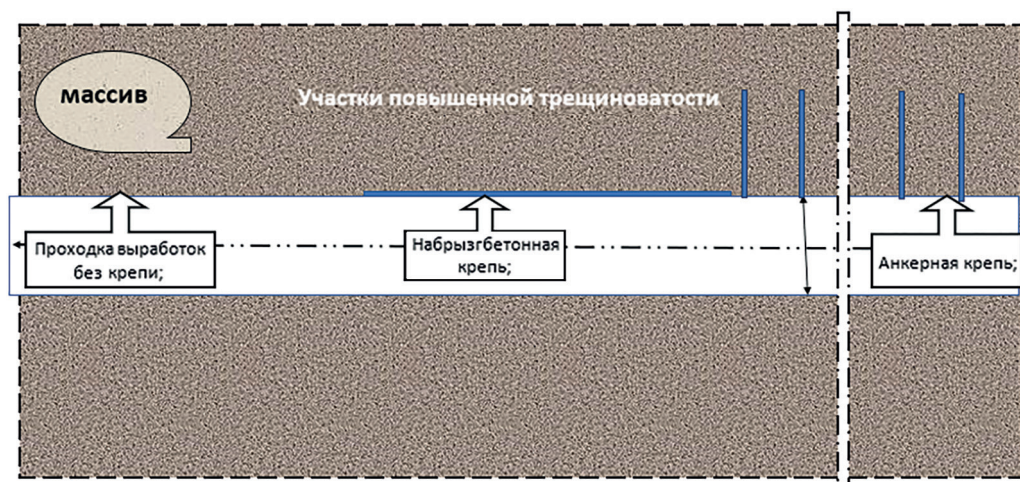


Рис. 4. Рекомендуемая конструкция крепи по методике Н. Бартона

Fig. 4. Recommended support design according to N. Barton's methodology

В табл. 2 представлены рекомендуемые типы крепи в зависимости от качества массива горных пород по Q-системе. В таблице указаны значения Q-индекса и соответствующие виды крепи, предлагаемые для выбора.

Согласно расчетам, выполненным по эмпирическому методу Н. Бартона, при значениях показателя Q в диапазоне 10–40 на Восточном участке месторождения Акжал возможно проведение

выработок без установки крепи. На участках с высокой трещиноватостью пород рекомендуется использовать анкерную или набрызг-бетонную крепь в соответствии с методикой Бартона.

На рис. 4 показано расположение конструкции крепи, соответствующее геомеханическим условиям рассматриваемого участка.

При изучении геомеханической классификации массива горных пород по

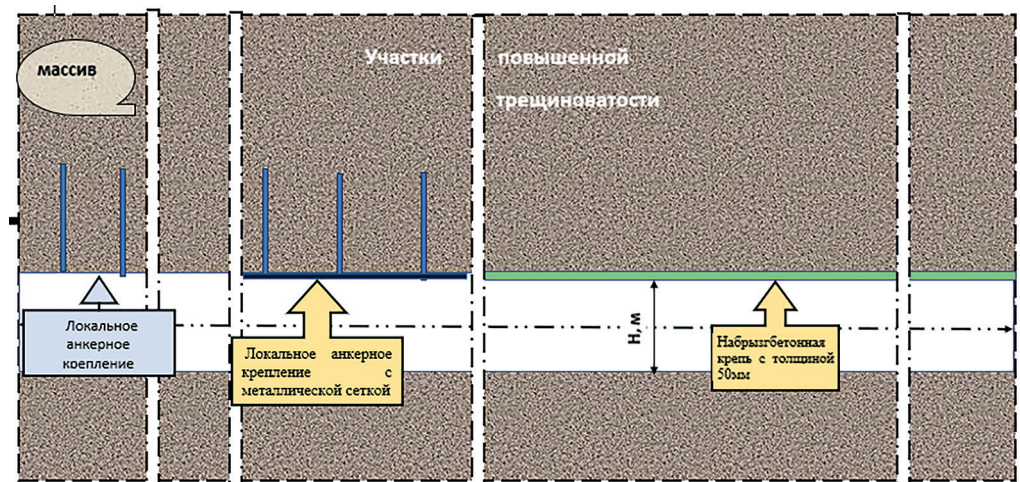


Рис. 5. Рекомендуемая конструкция крепи по методу З. Беньявского

Fig. 5. Recommended support design according to Z. Bieniawski's method

Таблица 3

Рекомендации по креплению в зависимости от значения критерия RMR
Support recommendations based on RMR criterion values

Величина критерия RMR	Крепление		
	анкера	набрызг-бетон	металлические арки
100 – 81	В общем случае крепление не выполняется, за исключением крепления отдельных участков анкерной крепью		
80 – 61	Локальная установка анкерной крепи в кровлю выработки длиной 3 м, с шагом 2,5 м. В отдельных случаях устанавливается металлическая сетка	50 мм в своде тоннеля в локальных участках	–
60 – 41	Систематическая установка анкеров длиной 4 м, шагом 1,5 – 2,0 м в кровле тоннеля и боках тоннеля. Установка металлической сетки в своде тоннеля	50 – 100 мм в своде тоннеля и 30 мм в боках тоннеля	–
40 – 21	Систематическая установка анкеров длиной 4 – 5 м, шагом 1,0 – 1,5 м в своде и боках с установкой металлической сетки	100 – 150 мм в своде тоннеля и 100 мм в боках	Легкие стальные рамы с шагом установки 1,5 м (по расчету)
< 20	Систематическая установка анкеров длиной 5 – 6 м, шаг расстановки 1,0 – 1,5 м в своде и боках тоннеля с установкой металлической сетки. Установка анкеров в обратный свод	150 – 200 мм в кровле, 150 мм в боках и 50 мм на лоб забоя	Рамы или арки средней/высокой несущей способности шагом 0,75 м. Передовое крепление лба забоя. Установка обратного свода

методу 3. Беньявского (система рейтинга RMR) было выделено шесть ключевых показателей, позволяющих комплексно оценить степень структурного нарушения массива. Эти показатели приведены в табл. 3.

На основе оценки качества горной породы по показателю RQD и геологического индекса прочности массива (GSI) для Восточного участка месторождения Акжал, согласно методу 3. Беньявского, рекомендуется следующий вид крепи при значении RMR = 61 – 80 (рис. 5): локальная установка анкерной крепи в кровлю выработки длиной 3 м с шагом 2,5 м. В отдельных случаях дополнительно применяют металлическую сетку или устанавливают крепь толщиной 50 мм на своде тоннеля в локальных зонах.

Методика определения устойчивости массива горных пород по СНИП

В качестве исходных данных для расчета устойчивости массива горных пород, смещений пород, нагрузок на крепь и параметров крепи выработки принимаются следующие параметры:

- расчетная глубина размещения выработки, H_p ;
- расчетные значения физико-механических свойств горных пород;
- нормативные и расчетные характеристики материалов крепи заполнения закрепного пространства.

Выбор типа и расчет параметров крепи горизонтальной и наклонной выработок следует производить в зависимости от категории устойчивости пород с

Таблица 4

Рекомендуемые виды крепей по всем категориям устойчивости
Recommended types of supports for all stability categories

Категория устойчивости	Рекомендуемые виды крепей
I категория	Анкерная или набрызг-бетонная крепь толщиной не менее 30 мм. В монолитных, малотрещиноватых породах допускается оставление выработок без крепи
II категория	Монолитная бетонную крепь, комбинированная из набрызг-бетона толщиной не менее 50 мм с анкерами и металлической сеткой или без нее, рамная крепь из железобетонных стоек с металлическими верхняками, сборная тьюбинговая, металлическая податливая крепь без обратного свода, анкер-металлическая, металлическая арочная крепь с набрызг-бетонным покрытием и тампоном закрепного пространства
III и IV категория	Сборная тьюбинговая и блочная, а при соответствующем обосновании металлобетонная, металлическая податливая и анкер-металлическая крепи; при этом в породах почвы I и II категорий устойчивости в крепи указанных типов обратный свод не предусматривается

учетом степени воздействия очистных работ и других выработок (табл. 4).

Согласно инженерным решениям и требованиям СНиП, для данных условий рекомендуется применение крепи I категории анкерного крепления или набрызг-бетонной облицовки толщиной не менее 30 мм. В устойчивых, монолитных и малотрещиноватых породах допускается проведение выработок без установки крепи (рис. 6). Следовательно,

выбор типа и параметров крепи определяется инженерно-геологическими условиями месторождения и направлен на обеспечение устойчивости выработок, а также безопасных условий их эксплуатации в процессе подземных горных работ.

Расчет нагрузки на крепь выполняется с дифференциацией по вертикальному (кровля и почва) и горизонтальному (бока) направлениям, с учетом

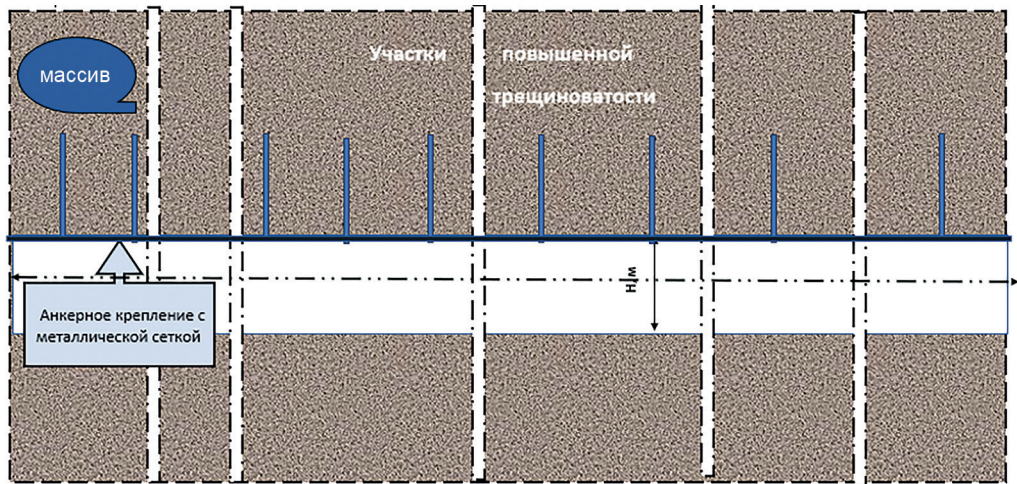


Рис. 6. Рекомендуемая конструкция крепи по СНиП

Fig. 6. Recommended support design according to Construction Norms and Regulations

угла падения пород и ориентации выработки относительно напластования. Нормативная нагрузка определяется с учетом смещений пород за срок службы выработки и конструктивных характеристик крепи.

Внутренние усилия в элементах крепи (изгибающий момент, продольная и поперечная силы) рассчитываются по стандартной методике для криволинейных и прямолинейных участков стойки с учетом вертикальных и горизонтальных нагрузок.

Подробная методика расчета, включая формулы, коэффициенты и расчетные схемы, приведена в источниках [28–30] и здесь используется для определения размеров и параметров крепи на месторождении Акжал.

Результаты расчета усилий на конструкции крепи

Расчет устойчивости горных пород и внутренних усилий в элементах крепи

выполнен с использованием программного комплекса Mathcad. В табл. 5 приведены исходные данные, использованные для расчета напряженно-деформированного состояния и определения конструктивных параметров крепи.

По результатам численного моделирования внутренних усилий в элементах крепи при различных площадях поперечных сечений установлено следующее.

Для сечения площадью 10,8 м² максимальное значение изгибающего момента на криволинейном участке составляет $M = 272,342$ кН·м, тогда как на прямолинейном участке наблюдается минимальное значение $M = -278,788$ кН·м.

Максимальная продольная сила на криволинейном участке достигает $N = 43,529$ кН, а на прямолинейном — $N = 180,714$ кН. Максимальные значения поперечной силы составляют соответственно $Q = -131,994$ кН и $Q = -177,287$ кН.

Таблица 5

Исходные данные для расчета Initial data for calculation

Показатели для расчета	Единица измерения	Сечение выработки S1	Сечение выработки S2	Сечение выработки S2м
Площадь сечения выработки	м ²	12,5	10,8	20,9
Ширина выработки	м	3,8	3,5	4,45
Высота выработки	м	3,5	3,3	4,45
h_0 — высота прямолинейной части стойки	м	1,65	1,35	2,0
R — радиус верхняка	м	2,30	2,30	3,46
Глубина расположения выработки	м	150	150	150
Крепость f		7,6	7,6	7,6
Прочность на сжатие	МПа	76	76	76
Прочность на растяжение	МПа	7,5	7,5	7,5
Угол внутреннего трения	град.	34	34	34
Коэффициент Пуассона		0,26	0,26	0,26
Модуль Юнга		8,10	8,10	8,10
Объемная масса	т/м ³	2,6	2,6	2,6

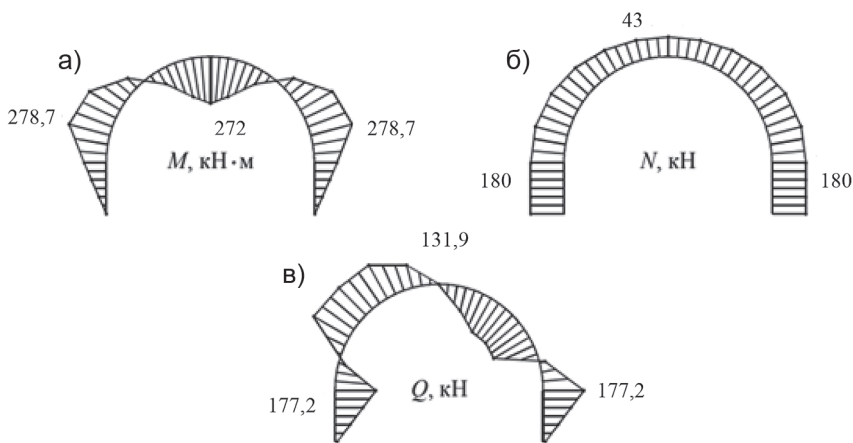


Рис. 7. Эпюры M (а), N (б), Q (в) на примере сечения выработки $S_1 = 10,8 \text{ м}^2$
 Fig. 7. Diagrams of M (а), N (б), and Q (v) for the example of a mine section $S_1 = 10.8 \text{ m}^2$

Для сечения площадью $12,5 \text{ м}^2$ отмечается снижение изгибающего момента на криволинейном участке до $M = 238,955 \text{ кН}\cdot\text{м}$, при этом на прямолинейном участке момент возрастает по модулю до $M = -321,605 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Продольные усилия составляют $N = 33,294 \text{ кН}$ (криволинейный участок) и $N = 166,447 \text{ кН}$ (прямолинейный участок). Поперечные силы изменяются в диапазоне от $Q = 149,025 \text{ кН}$ до $Q = -187,306 \text{ кН}$.

Для сечения площадью $20,92 \text{ м}^2$ отмечено увеличение изгибающих моментов, где на криволинейном участке $M = 422,612 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а на прямолинейном — $M = -402,251 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Продольные силы составляют $N = 38,847 \text{ кН}$ и $N = 186,569 \text{ кН}$, а поперечные силы — $Q = 142,737 \text{ кН}$ и $Q = -185,104 \text{ кН}$ соответственно.

Результаты расчетов наглядно представлены на примере сечения площадью $10,8 \text{ м}^2$ на эпюрах M , Q , N (рис. 7).

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении площади поперечного сечения крепи наблюдается закономерное возрастание изгибающих моментов и продольных усилий, особенно на прямолинейных участках конструкции, что связано с перераспреде-

нием нагрузок и изменением жесткости крепи. При этом криволинейные участки воспринимают меньшую долю изгибающих воздействий, но характеризуются значительными поперечными усилиями, обусловленными действием бокового давления массива пород.

В целом, по результатам расчета внутренних усилий на крепь наблюдаются высокие показатели сжатия и растяжения. Поэтому набрызг-бетонная крепь ненадежна — ввиду того, что данная конструкция крепи функционально не сможет длительно выдерживать полученную математическими расчетами нагрузку; рекомендуемые конструкции крепи представлены на рис. 8 и 9. Предлагаем применить анкерную крепь в комбинации с металлической сеткой, которая будет работать на сжатие и изгиб, к тому же она безопасна и обеспечивает надежную устойчивость горных выработок.

Методика определения параметра анкерной крепи

Длина анкеров определяется исходя из ширины выработки (B) и времени ее существования ESR:

$$L = \frac{2 + 0,15B}{ESR}, \text{ м} \quad (1)$$

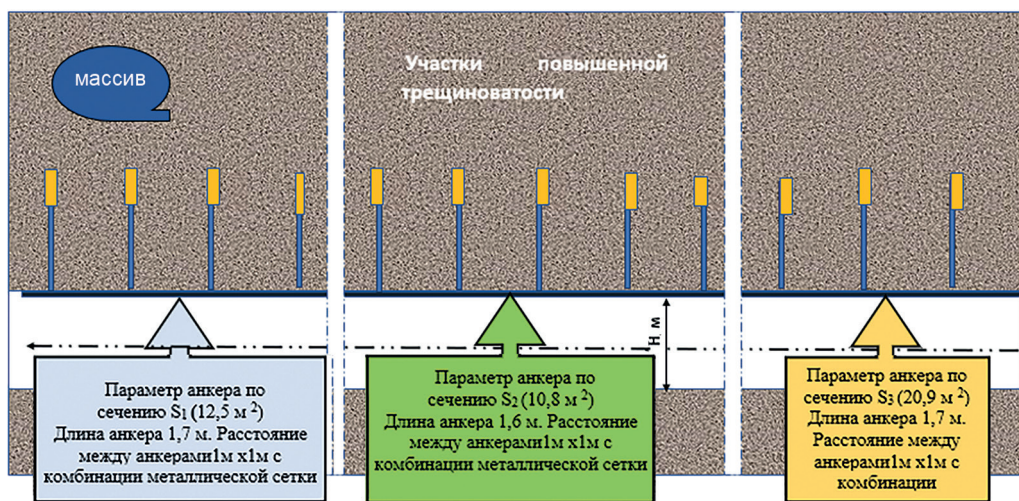


Рис. 8 Рекомендуемая конструкция крепи
Fig. 8 Recommended support design

Значение ESR определяется видами горных выработок и их размерами сечений:

- околоствольных дворов, камер дробления, насосных и т.д. — 0,9–1,0;
- для всех остальных горизонтальных и наклонных выработок — 1,2–1,3;
- вертикальных выработок круглого сечения — 2,5–3,0;

- вертикальных выработок прямоугольного сечения — 2,0–2,5;

Длина анкеров $L_{\text{щ}}$, м, дополнительно оценивается с учетом высоты свода возможного обрушения пород ($h_{об}$) по формуле

$$L_{\text{щ}} = L_a + L_3 + L_b, \text{ м} \quad (2)$$

где L_a — длина штанги, равная высоте области активных (опасных) деформаций

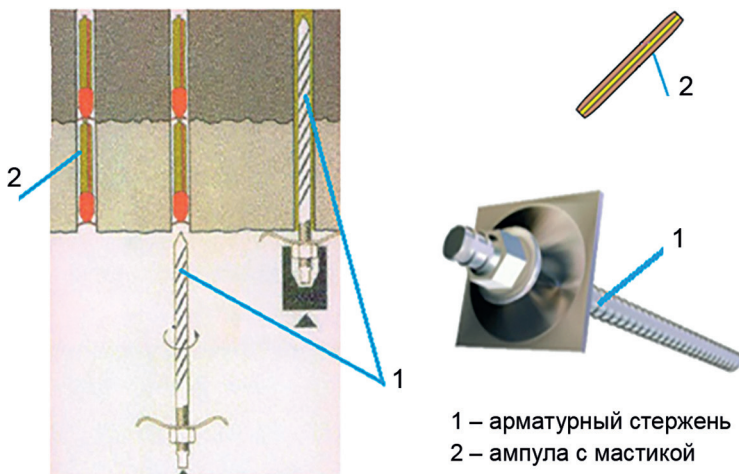


Рис. 9. Металлополимерный анкер АКЦ:
Fig. 9. Metal-polymer anchor AKTs

Таблица 6

Основные расчетные показатели параметров анкерной крепи
Main calculated parameters of the anchor support

Параметры анкерной крепи	Измерение	По сечению выработки 10,8 м ²	По сечению выработки 12,5 м ²	По сечению выработки 20,9 м ²
Длина анкеров	м	1,697	1,62	1,726
Расстояние между штангами	м	1,726	2,048	1,697

ций или мощности поддерживаемых или отслаивающихся пород, ($h_{об}$), м; L_3 — длина замковой части штанги, т.е. величина ее заглубления в массив за область активных деформаций, м; $L_в$ — часть штанги, выступающей в выработку, принимать от 0,1 до 0,08 м.

Основным параметром, определяющим длину штанги, является мощность поддерживаемого слоя непосредственной кровли (L_a), которая определяется

на основании геологических разрезов, статистической обработки данных о распадающихся породах или инструментальных наблюдений. В ходе исследования параметров анкерной крепи был выполнен расчет в специализированной программе на основе расчетных характеристик анкеров, с учетом коэффициента запаса прочности.

Результаты расчетов представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 7

Рекомендуемые параметры анкерной крепи
Recommended parameters of the anchor support

Размеры выработок в проходке, м		Параметры крепи		
ширина	высота	длина штанг, м	плотность установки анкеров, шт/м ²	расстояние между анкерами в ряду и рядами штанг, $u \times t$, м×м
Породы I категории				
сопряжения	сопряжения	2,0	1,00	1,0×1,0
Породы II—III категории устойчивости				
2,15—2,85	2,55—2,95	1,6	1,00	1,0×1,0
2,90—3,25	2,80—3,00	1,8	1,00	1,0×1,0
3,30—3,75	2,70—3,10	1,8	1,24	0,9×0,9
3,80—4,10	2,70—3,10	1,8	1,39	0,85×0,85
4,15—4,30	2,80—3,50	1,8	1,56	0,8×0,8
4,40—4,70	2,85—3,50	2,0	1,56	0,8×0,8
4,75—5,20	2,90—4,30	2,2	1,60	0,8×0,8
сопряжения	сопряжения	2,2	1,60	0,8×0,8
Породы IV категории устойчивости				
2,90—3,15	2,95—3,05	1,8	1,56	0,8×0,8
3,20—3,40	2,85—3,15	1,8	1,56	0,8×0,8
3,50—4,10	2,95—3,35	2,0	1,78	0,75×0,75
4,20—4,70	3,10—4,30	2,2	2,04	0,7×0,7
сопряжения	сопряжения	2,4	2,04	0,7×0,7

Обсуждение результатов

Проведенные расчеты и анализ полученных данных позволили выявить взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием массива горных пород и величинами внутренних усилий, возникающих в элементах крепи транспортного штрека при различных геометрических параметрах выработки.

Сравнение результатов расчетов показало, что увеличение площади поперечного сечения выработки приводит к закономерному росту изгибающих моментов и продольных усилий в элементах крепи. Наиболее высокие значения изгибающих моментов наблюдаются в прямолинейных участках конструкции, где воздействие горного давления проявляется наиболее интенсивно. В то же время криволинейные участки характеризуются меньшими изгибающими моментами, но более значительными поперечными силами, что свидетельствует о перераспределении нагрузок и повышенной восприимчивости к боковому давлению массива.

Сопоставление расчетных данных для сечений площадью $10,8 \text{ м}^2$, $12,5 \text{ м}^2$ и $20,92 \text{ м}^2$ показало, что при увеличении размеров выработки наблюдается не только рост усилий, но и изменение характера их распределения по длине крепи. Для наибольшего сечения ($20,92 \text{ м}^2$) выявлено существенное увеличение изгибающих моментов (до $422,612 \text{ кН}\cdot\text{м}$ на криволинейном участке), что требует применения более жесткой системы крепления. Это подтверждает необходимость комплексного учета размеров выработки, механических свойств пород и конструктивных особенностей крепи при проектировании.

Результаты моделирования в Mathcad также показали, что устойчивость породного массива тесно связана со степенью структурного ослабления и тре-

щиноватости пород. В зонах повышенной трещиноватости и измененного состояния горных пород рекомендуется применение комбинированных типов крепи (жестко-податливых систем), способных компенсировать неравномерные деформации массива.

Сравнение полученных данных с нормативными рекомендациями (СН РК 2.03-04-2013, RMR, Q-система и методика З. Бенявского) подтверждает адекватность выбранного подхода. Расхождение между расчетными и нормативными значениями коэффициента устойчивости не превышает $8-10\%$, что свидетельствует о достоверности численных результатов и корректности используемой модели.

Анализ полученных данных позволил определить рациональные конструктивные параметры крепления, обеспечивающие требуемый запас устойчивости при минимальном перерасходе материалов. Применение предложенных параметров позволит повысить долговечность и безопасность эксплуатации транспортного штрека, снизить риск деформаций и локальных обрушений, а также оптимизировать затраты на ремонт и обслуживание горных выработок.

Заключение

На основе анализа горно-геологических и горнотехнических условий для определения основных параметров подземных выработок и оценки устойчивости массива горных пород Восточного участка месторождения Акжал предложены рекомендуемые типы крепления. Приведены типы крепи в зависимости от категории устойчивости массива по Q-индексу. Для участков с достаточной прочностью пород допускается проходка без установки крепи, тогда как на зонах с высокой трещиноватостью рекомендуется использовать анкерную или набрызг-бетонную крепь в соответст-

вии с методикой Н. Бартона. Исходя из определения качества горной породы RQD и геологического индекса прочности пород (GSI) для Восточного участка месторождения Акжал по методу З. Беньявского, рекомендованы следующие крепи (если значение RMR = 80–61): локальная установка анкерной крепи в кровлю выработки длиной 3 м, с шагом 2.5 м.

В некоторых случаях дополнительно устанавливается металлическая сетка или крепь толщиной 50 мм на локальных участках свода выработки. Параметры крепи принимаются на основании основных расчетных данных для оценки устойчивости массива пород и величины их смещений в соответствии с требованиями СНиП. Согласно исследованию и расчетам нагрузки на крепь рекомендована комбинированная крепь

с конструкцией в комбинации анкера и металлической сетки для условий месторождения Акжал.

Исследования проведены в рамках грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для реализации научно-исследовательских задач по календарному плану на 2024–2026 годы ИГД им. Д.А. Кунаева по теме НИР (ГФ 24-26, ИРН АР 23488767) – «Разработка и обоснование эффективных систем отработки рудных залежей сложной морфологии», они являются актуальными и направленными на решение проблемы по обоснованию конструктивных параметров крепления транспортного штрека в горнотехнических условиях шахты Акжал в условиях сложной морфологии месторождений Казахстана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bekbergenov D., Jangulova G., Abdikarim Z., Zhanakova R. Modeling of geomechanical processes from open pit to underground mining with complex morphology // *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 7, pp. 2862–2888.

2. Бекбергенев Д. К., Зейнуллин А. А., Джангулова Г. К., Жанакова Р. К., Бектибаев У. А. Обоснование подземной геотехнологии отработки месторождений со сложной морфологией на примере рудника Акжал // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2025. – № 12-2. – С. 35–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_33.

3. Bekbergenov D., Jangulova G., Zeinullin A., Zhanakova R., Shagirova K. Modeling of geomechanical processes from open pit to underground mining with complex morphology // *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2025, vol. 11, no. 7, article 13. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-07-013. <https://www.scopus.com/pages/publications/105013162754?origin=resultlist>.

4. Almenov T., Zhanakova R., Shautenov M., Askarova G., Agybayev N., Assylkhanova S. GPR-driven geomechanical modeling and drill-blast optimization for enhanced efficiency in open-pit gold mining // *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2025, vol. 11, no. 1, DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-11-010. <https://www.scopus.com/pages/publications/105026140949?origin=resultlist>.

5. Fedorov E., Bekbergenov D., Jangulova G. Modeling and methodology for calculating the strength of a man-made bottom in a system with self-destruction of ore for ecologically safe mining // *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, article 03018. DOI: 10.1051/e3sconf/202019203018.

6. Akishev K. M., Aryngazin K. S., Tleulessov K., Bulyga L. L., Stanevich V. T. The use of simulation modeling in calculating the productivity of the technological system for the production of building products with fillers from man-made waste // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2024, no. 4, pp. 22–32. DOI: 10.32014/2024.2518-170X.422.

7. Яковлев В. Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых // *Горная промышленность*. – 2022. – № 1S. – С. 34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

8. Wang C., Liu X., Zhang L., Xu C. Ground behaviors analysis of a stope covered by the thin bedrock and large-thick alluvium: A case study // *Advances in Civil Engineering*. 2022, vol. 2022, article 6176316.

9. Demin V., Kalinin A., Tomilova N., Tomilov A., Akpanbayeva A., Shokarev D., Popov A. Advanced digital modeling of stress–strain behavior in rock masses to ensure stability of underground mine workings // *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 1072–1087. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-03-014.

10. Chen H., Guo Q., Wang L., Meng X. Evaluation of slope stability within the influence of mining based on combined weighting and finite cloud model // *Energy Exploration & Exploitation*. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 636–655. DOI: 10.1177/01445987221134638.

11. Makarov P. V., Eremin M. O. Rock mass as a nonlinear dynamic system: Mathematical modeling of stress strain state evolution in the rock mass around a mine opening // *Physical Mesomechanics*. 2018, vol. 21, no. 4, pp. 311–320.

12. Lemaire E., Mreyen A.-S., Dufresne A., Havenith H.-B. Analysis of the influence of structural geology on the massive seismic slope failure potential supported by numerical modelling // *Geosciences*. 2020, vol. 10, no. 8, article 323. DOI: 10.3390/geosciences10080323.

13. Каплунов Д. Р. Геомеханическое обеспечение устойчивости горных выработок при подземной разработке месторождений. — М.: Изд-во «Горная книга», 2021. — 312 с.

14. Глухов В. С., Елисеев И. П. Моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород в сложных горно-геологических условиях // *Известия вузов. Горный журнал*. — 2022. — № 8. — С. 45–53.

15. Сидляр А. В. Разработка и обоснование мероприятий геомеханической безопасности при освоении Николаевского полиметаллического месторождения со сложным тектоническим строением: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Хабаровск, 2021. — 157 с.

16. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабьирь Н. В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 253. — С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

17. Stemm E., Krampf F. Injury severity and influence factors in surface mines: A correspondence analysis // *Safety Science*. 2022, vol. 145, article 105495. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105495.

18. Joe-Asare T., Stemm E., Amegbey N. Causal and contributing factors of accidents in the Ghanaian mining industry // *Safety Science*. 2023, vol. 159, article 106036. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.106036.

19. Diulin D. A., Prushak V. Y., Gegedesh M. G. Analysis of the stress-strain state of problematic sections of the shaft of the mine using computer simulation // *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2023, vol. 67, no. 4, pp. 322–330. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-4-322-330.

20. Isabek T., Orynbeke Y., Kozhogulov K., Sarkulova Z., Abdiyeva L., Yefremova S. Geomechanical substantiation of the parameters for the mining system with ore shrinkage in the combined mining of steep-dipping ore bodies // *Mining of Mineral Deposits*. 2022, vol. 16, no. 4, pp. 115–121. DOI: 10.33271/mining16.04.115.

21. Суимбаева А. М. Геотехнологические исследования по обоснованию параметров устойчивости массива горных пород при комбинированной разработке (на примере месторождения Акжал): автореферат докт. философии (PhD). — Караганда: КарТУ, 2020. — 28 с.

22. Абдрахманов Н. Н., Ержанов С. Б. Геомеханические основы проектирования и поддержания горных выработок в сложных условиях. — Алматы: КазНИГРИ, 2021. — 212 с.

23. Begalinov A., Shautenov M., Almenov T., Bektur B. Leaching process intensification of gold-bearing raw materials // *Mining of Mineral Deposits*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 42–48. DOI: 10.33271/mining16.02.042.

24. Куанышев Е. Б., Жаксыбаева Г. А. Геомеханическое обоснование параметров крепи в транспортных выработках месторождений Центрального Казахстана // *Геотехническая механика*. — 2022. — № 4. — С. 58–65.

25. Almenov T., Zhanakova R., Sarybayev M., Shabaz D.-M. A novel approach to selecting rational supports for underground mining workings // *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 1217–1241. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-03-022.

26. Almenov T. M., Zhanakova R. K., Askarova G. E., Shautenov M. R., Amantayuly K. Comprehensive assessment of ore losses and dilution impacting Vasilkovsky gold deposit profitability // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2025, vol. 4, no. 472, pp. 27–45. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.528.

27. Алиев С. Б., Демин В. Ф., Кушеков К. К., Разумняк Н. Л. Конструирование технологических схем проведения подготовительных горных выработок // Горная промышленность. — 2023. — № 2. — С. 41–49.

28. Barton N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. London: Taylor & Francis, 2006, 745 p.

29. Жанакова Р. К. Исследование и совершенствование конструкций крепи подземных горных выработок: автореф. дис. ... докт. философии (PhD). — Алматы, 2021. — 25 с.

30. Begalinov A., Almenov T., Zhanakova R., Bektur B. Analysis of the stress deformed state of rocks around the haulage roadway of the Beskempir field (Kazakhstan) // Mining of Mineral Deposits. 2020, vol. 14, no. 3, pp. 28–36. DOI: 10.33271/mining14.03.028. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Bekbergenov D., Jangulova G., Abdikarim Z., Zhanakova R. Modeling of geomechanical processes from open pit to underground mining with complex morphology. *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 7, pp. 2862–2888.

2. Bekbergenov D., Zeinullin A., Jangulova G., Zhanakova R., Bektibayev U. Substantiation of geotechnology 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_12_0_33.

3. Bekbergenov D., Jangulova G., Zeinullin A., Zhanakova R., Shagirowa K. Modeling of geomechanical processes from open pit to underground mining with complex morphology. *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2025, vol. 11, no. 7, article 13. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-07-013. <https://www.scopus.com/pages/publications/105013162754?origin=resultlist>.

4. Almenov T., Zhanakova R., Shautenov M., Askarova G., Agybayev N., Assylkhanova S. GPR-driven geomechanical modeling and drill-blast optimization for enhanced efficiency in open-pit gold mining. *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2025, vol. 11, no. 1, DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-11-010. <https://www.scopus.com/pages/publications/105026140949?origin=resultlist>.

5. Fedorov E., Bekbergenov D., Jangulova G. Modeling and methodology for calculating the strength of a man-made bottom in a system with self-destruction of ore for ecologically safe mining. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, article 03018. DOI: 10.1051/e3sconf/202019203018.

6. Akishev K. M., Aryngazin K. S., Tleulessov K., Bulyga L. L., Stanevich V. T. The use of simulation modeling in calculating the productivity of the technological system for the production of building products with fillers from man-made waste. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2024, no. 4, pp. 22–32. DOI: 10.32014/2024.2518-170X.422.

7. Yakovlev V. L. Key stages and results of research to formulate methodological basis for the strategy to develop mining systems for deep seated deposits of solid minerals. *Russian Mining Industry*. 2022, no. 1s, pp. 34–45. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

8. Wang C., Liu X., Zhang L., Xu C. Ground behaviors analysis of a slope covered by the thin bedrock and large-thick alluvium: A case study. *Advances in Civil Engineering*. 2022, vol. 2022, article 6176316.

9. Demin V., Kalinin A., Tomilova N., Tomilov A., Akpanbayeva A., Shokarev D., Popov A. Advanced digital modeling of stress–strain behavior in rock masses to ensure stability of underground mine workings. *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 1072–1087. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-03-014.

10. Chen H., Guo Q., Wang L., Meng X. Evaluation of slope stability within the influence of mining based on combined weighting and finite cloud model. *Energy Exploration & Exploitation*. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 636–655. DOI: 10.1177/01445987221134638.

11. Makarov P. V., Eremin M. O. Rock mass as a nonlinear dynamic system: Mathematical modeling of stress strain state evolution in the rock mass around a mine opening. *Physical Mesomechanics*. 2018, vol. 21, no. 4, pp. 311–320.

12. Lemaire E., Mreyen A.-S., Dufresne A., Havenith H.-B. Analysis of the influence of structural geology on the massive seismic slope failure potential supported by numerical modelling. *Geosciences*. 2020, vol. 10, no. 8, article 323. DOI: 10.3390/geosciences10080323.

13. Kaplunov D. R. *Geomekhanicheskoe obespechenie ustoychivosti gornyykh vyrabotok pri podzemnoy razrabotke mestorozhdeniy* [Geomechanical support of the stability of mine workings in underground mining], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2021, 312 p.

14. Glukhov V. S., Eliseev I. P. Modeling the stress-strain state of rocks in complex mining and geological conditions. *Minerals and Mining Engineering*. 2022, no. 8, pp. 45–53. [In Russ].

15. Sidlyar A. V. *Razrabotka i obosnovanie meropriyatiy geomekhanicheskoy bezopasnosti pri osvoenii Nikolaevskogo polimetallicheskogo mestorozhdeniya so slozhnym tektonicheskim stroeniem* [Development and justification of geomechanical safety measures during the development of the Nikolaev polymetallic deposit with a complex tectonic structure], Candidate's thesis, Khabarovsk, 2021, 157 p.

16. Rybak J., Khayrutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun Ch. B., Babyr N. V. Prediction of the geomechanical state of the mass during the mining of salt deposits with backfilling. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61–70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

17. Stemn E., Krampah F. Injury severity and influence factors in surface mines: A correspondence analysis. *Safety Science*. 2022, vol. 145, article 105495. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105495.

18. Joe-Asare T., Stemn E., Amegbey N. Causal and contributing factors of accidents in the Ghanaian mining industry. *Safety Science*. 2023, vol. 159, article 106036. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.106036.

19. Diulin D. A., Prushak V. Y., Gegedesh M. G. Analysis of the stress-strain state of problematic sections of the shaft of the mine using computer simulation. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2023, vol. 67, no. 4, pp. 322–330. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-4-322-330.

20. Isabek T., Orynbek Y., Kozhogulov K., Sarkulova Z., Abdiyeva L., Yefremova S. Geomechanical substantiation of the parameters for the mining system with ore shrinkage in the combined mining of steep-dipping ore bodies. *Mining of Mineral Deposits*. 2022, vol. 16, no. 4, pp. 115–121. DOI: 10.33271/mining16.04.115.

21. Suimbaeva A. M. *Geotekhnologicheskie issledovaniya po obosnovaniyu parametrov ustoychivosti massiva gornyykh porod pri kombinirovannoy razrabotke (na primere mestorozhdeniya Akzhal)* [Geotechnological research to justify the stability parameters of the rock mass during combined mining (on the example of the Akzhal deposit)], PhD thesis, Karaganda, 2020, 28 p.

22. Abdrakhmanov N. N., Erzhanov S. B. *Geomekhanicheskie osnovy proektirovaniya i podderzhaniya gornyykh vyrabotok v slozhnykh usloviyakh* [Geomechanical foundations for the design and maintenance of mine workings in complex conditions], Almaty, 2021, 212 p.

23. Begalinov A., Shautenov M., Almenov T., Bektur B. Leaching process intensification of gold-bearing raw materials. *Mining of Mineral Deposits*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 42–48. DOI: 10.33271/mining16.02.042.

24. Kuanyshiev E. B., Zhaksybaeva G. A. Geomechanical substantiation of support parameters in transport workings of deposits in Central Kazakhstan. *Geotekhnicheskaya Mekhanika*. 2022, no. 4, pp. 58–65. [In Russ].

25. Almenov T., Zhanakova R., Sarybayev M., Shabaz D.-M. A novel approach to selecting rational supports for underground mining workings. *Civil Engineering Journal*. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 1217–1241. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-03-022.

26. Almenov T. M., Zhanakova R. K., Askarova G. E., Shautenov M. R., Amantayuly K. Comprehensive assessment of ore losses and dilution impacting Vasilkovsky gold deposit profitability. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2025, vol. 4, no. 472, pp. 27–45. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.528.

27. Aliev S. B., Demin V. F., Kushekov K. K., Razumnyak N. L. Construction of technological schemes for driving preparatory mine workings. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 2, pp. 41–49. [In Russ].

28. Barton N. *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*. London, Taylor & Francis, 2006, 745 p.

29. Zhanakova R. K. *Issledovanie i sovershenstvovanie konstruktsiy krepki podzemnykh gornyykh vyrabotok* [Research and improvement of support structures for underground mine workings], PhD thesis, Almaty, 2021, 25 p.

30. Begalinov A., Almenov T., Zhanakova R., Bektur B. Analysis of the stress deformed state of rocks around the haulage roadway of the Beskempir field (Kazakhstan). *Mining of Mineral Deposits*. 2020, vol. 14, no. 3, pp. 28–36. DOI: 10.33271/mining14.03.028.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бекбергенов Досанбай Калдарбаевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Алматы, Казахстан, член-корреспондент Национальной академии горных наук Республики Казахстан, e-mail: kdbekbergen@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7866-1031,

Зейнуллин Абдикарим Абжалелович — д-р техн. наук, профессор, Казахский университет технологии и бизнеса имени К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: karim_57@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8069-0037,

Джангулова Гульнар Кабатаевна — канд. техн. наук, профессор, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан, e-mail: gulnarzan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7866-1031,

Жанакова Раиса Кульмахановна — PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru, e-mail: r.zhanakova@satbayev.university, ORCID ID: 0000-0003-0845-8449,

Бектибаев Уайс Амандыкович — руководитель лаборатории, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Алматы, Казахстан, e-mail: uays.bektibaev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0273-9657.

Для контактов: Жанакова Р.К., e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D. Bekbergenov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan, Corresponding Member of the National Academy of Mining Sciences of the Republic of Kazakhstan, e-mail: kdbekbergen@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7866-1031,

A. Zeinullin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan, e-mail: karim_57@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8069-0037,

G.K. Jangulova, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: gulnarzan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7866-1031,

R.K. Zhanakova, PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru, e-mail: r.zhanakova@satbayev.university, ORCID ID: 0000-0003-0845-8449,

U. Bektibayev, Head of Laboratory, D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan, e-mail: uays.bektibaev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0273-9657.

Corresponding author: R.K. Zhanakova, e-mail: zhanakova_raisa@mail.ru.

Получена редакцией 21.12.2025; получена после рецензии 12.01.2026; принята к печати 19.01.2026.
Received by the editors 21.12.2025; received after the review 12.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.