

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела

Кафедра Геофизика и сейсмология

Таласов Максим Андреевич

«Изучение зон напряженно-деформированного состояния горного массива в подземной
выработке разрабатываемого рудного месторождения по геофизическим данным»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07105 – «Нефтегазовая и рудная геофизика»

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела

Таласов Максим Андреевич

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации «Изучение зон напряженно-деформированного состояния
горного массива в подземной выработке разрабатываемого рудного
месторождения по геофизическим данным»

Направление подготовки 7M07105 Нефтегазовая и рудная геофизика

Научный руководитель, доктор г.м-н,
Профессор

 Истекова С.А.

«20» 06 2025 г.

Рецензент

Кандидат технических наук,
Ассоциированный профессор
 Аршидинова М.Т.

«23» 06 2025 г.

Норм контроль

Старший преподаватель кафедры
Геофизики и сейсмологии

 Асирбек Н.А.

«20» 06 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
Геофизики и сейсмологии,
Доктор т-н, профессор

 Ратов Б.Т.

«27» 06 2025 г.



Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела

Кафедра Геофизика и сейсмология

7M07105 – «Нефтегазовая и рудная геофизика»



ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Таласову Максиму Андреевичу

Тема «Изучение влияния зон напряженно-деформированного состояния горного массива в подземной выработке разрабатываемого рудного месторождения по геофизическим данным»

Утверждена приказом № 548 – П/О от 4 декабря 2023 года.

Срок сдачи законченной диссертации 26 июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: *Геологические, геофизические, текстовые и графические материалы по Центральному Казахстану*

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- 1) Сбор, обобщение и анализ полученных по результатам прошлых лет лабораторных исследований физико-механических статических и динамических характеристик горных пород (геомеханических) в горных массивах подземных выработок.
- 2) Изучение на основе обработки данных сейсморазведки распределения скорости продольной волны и акустического импеданса для получения упругих параметров горных пород в горном массиве исследуемого участка разрабатываемого месторождения.
- 3) Установление корреляционных зависимостей между геомеханическими и упругими параметрами горных пород, полученных по данным сейсморазведки.
- 4) Изучение геомеханических параметров по результатам комплексного анализа геомеханических свойств и геофизических исследований (ГИС, упругие свойства по сейсмическим данным) в горных массивах подземных выработок.

Рекомендуемая основная литература:

1. Истекова С.А., Ан Е.А. К вопросу о применении высокоразрешающей 3D сейсморазведки на рудных месторождениях Казахстана // Труды Сатпаевских чтений Т1. – 2019. – С54-58

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Сбор, обобщение и анализ полученных по результатам прошлых лет лабораторных исследований физико-механических статических и динамических характеристик горных пород (геомеханических) в горных массивах подземных выработок	02.02.2025	выполнено
Изучение на основе обработки данных сейсморазведки распределения скорости продольной волны и акустического импеданса для получения упругих параметров горных пород в горном массиве исследуемого участка разрабатываемого месторождения	13.03.2025	выполнено
Установление корреляционных зависимостей между геомеханическими и упругими параметрами горных пород, полученных по данным сейсморазведки	05.05.2025	выполнено
Изучение геомеханических параметров по результатам комплексного анализа геомеханических свойств и геофизических исследований (ГИС, упругие свойства по сейсмические данным) в горных массивах подземных выработок	01.06.2025	выполнено

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

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписа- ния	Подпись
Сбор, обобщение и анализ полученных по результатам прошлых лет лабораторных исследований физико-механических статических и динамических характеристик горных пород (геомеханических) в горных массивах подземных выработок	С.А. Истекова доктор геол.- минерал. наук, профессор	06.02.2025	
Изучение на основе обработки данных сейсморазведки распределения скорости продольной волны и акустического импеданса для получения упругих параметров горных пород в горном массиве исследуемого участка разрабатываемого месторождения	С.А. Истекова доктор геол.- минерал. наук, профессор	18.03.2025	
Установление корреляционных зависимостей между геомеханическими и упругими параметрами горных пород, полученных по данным сейсморазведки	С.А. Истекова доктор геол.- минерал. наук, профессор	10.05.2025	
Изучение геомеханических параметров по результатам комплексного анализа геомеханических свойств и геофизических исследований (ГИС, упругие свойства по сейсмические данным) в горных массивах подземных выработок	С.А. Истекова доктор геол.- минерал. наук, профессор	04.06.2025	
Норм контролер	Н.А. Асирбек старший преподаватель	20.06.2025	

Научный руководитель



Истекова С.А.

Задание принял к исполнению магистрант



Таласов М.А.

Дата

«20» 06 2025 г

АНДАТПА

Диссертациялық жұмыс жерасты кен орнында геофизикалық мәліметтер негізінде тау жыныстары массивінің кернеулі-деформациялық күй аймақтарының әсерін зерттеуге арналған. Жұмыста сейсмикалық барлау деректері мен керн және тау жыныстары үлгілерінің зертханалық зерттеулері негізінде тау жыныстары массивінің геомеханикалық сипаттамаларын бағалау әдістемесі ұсынылған. Зерттеу үшін Жаман-Айбат мыс құмтас кен орнын игеріп жатқан Жомарт кенішінің жергілікті учаскесінде жүргізілген профильдік егжей-тегжейлі сейсмикалық барлау нәтижелері пайдаланылды. Өткен жылдарда алынған керн және тау жыныстары үлгілерінің зертханалық талдау нәтижелері — соның ішінде беріктік және серпімділік сипаттамалары — жинақталып, талданды және жүйеленді. Бұл мәліметтер сейсмикалық барлау нәтижелерімен толықтырылып, бойлық серпімді толқындардың таралу жылдамдығы негізінде тау жыныстары массивінің серпімділік сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік берді. Геофизикалық параметрлер мен тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері арасындағы өзара байланыс анықталып, бұл болжамды мәліметтерден массивтің геомеханикалық күйін неғұрлым дәл бағалауға жол ашты. Нәтижесінде кернеулі-деформациялық күй аймақтарына баға беріліп, деформациялану және тұрақтылықты жоғалту қаупі жоғары учаскелер айқындалды. Бұл тау-кен жұмыстарының қауіпсіздігін арттыру және технологиялық процестерді оңтайландыру үшін алдын ала техникалық шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа посвящена изучению влияния зон напряженно-деформированного состояния горного массива по геофизическим данным в подземной выработке, разрабатываемого рудного месторождения камерно-столбовым способом. В работе показана методика оценки геомеханических характеристик горного массива на основе данных сейсморазведки и лабораторных исследований керна и образцов горных пород. Используются результаты профильной детальной сейсморазведки, выполненной на локальном участке рудника Жомарт, разрабатываемого месторождения медистых песчаников Жаман-Айбат. Проведён сбор, анализ и обобщение результатов анализа лабораторных исследований керна и образцов горных пород прошлых лет, в том числе характеристик прочности и упругости пород. Эти данные были дополнены результатами сейсморазведки, позволившие по рассчитанным параметрам распределения скоростей продольных упругих волн, получить упругие характеристики горного массива. Установлены взаимосвязи между геофизическими параметрами и физико-механическими свойствами горных пород, что позволило перейти от прогнозируемых данных к более точной оценке геомеханического состояния массива по всей исследуемой площади. В итоге дана оценка зон напряжённо-деформированного состояния, определены участки с повышенным риском деформаций и потери устойчивости. Это позволяет заранее принимать технические решения для оптимизации технологических процессов разработки и повышения безопасности горных работ.

ANNOTATION

The dissertation is devoted to studying the influence of stress-strain state zones in a rock massif based on geophysical data obtained from an underground working developed using the room-and-pillar method. The paper presents a methodology for assessing the geomechanical characteristics of the rock massif using seismic exploration data and laboratory studies of core and rock samples. The results of a detailed profile seismic survey conducted at a local site of the Zhomart mine, which is developed within the Zhaman-Aibat copper sandstone deposit, were used. Laboratory data from core and rock samples collected in previous years—including rock strength and elasticity characteristics—were compiled, analyzed, and summarized. These data were supplemented with seismic survey results, enabling the determination of the elastic properties of the rock massif based on calculated parameters of longitudinal elastic wave distribution. Correlations between geophysical parameters and the physical and mechanical properties of the rocks were established, allowing for a transition from predicted values to a more accurate assessment of the geomechanical state of the massif across the entire study area. As a result, stress-strain state zones were assessed, and areas with an increased risk of deformation and loss of stability were identified. This enables the early implementation of technical solutions to optimize technological development processes and improve mining safety.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1. Возможности применения геофизических методов при мониторинге подземной разработки рудных месторождений	13
1.1 Теоретические основы применения геофизических методов при контроле за разработкой рудных месторождений	13
1.2 Обзор и анализ современных отечественных и зарубежных методов оценки текущего геомеханического состояния рудных месторождений и связанных с этим проблем	20
2. Характеристика исходных данных	24
2.1 Общие сведения об объекте исследований	24
2.2 Геолого-геофизическая изученность и краткое геологическое строение района работ	25
2.3 Петрофизическая характеристика геологических комплексов рудника Жомарт	34
3. Общее состояние напряженно-деформированного состояния массива горных пород рудника Жомарт	46
3.1 Горно-геологические условия разработки месторождения Жомарт	46
3.2 Горно-технические условия разработки месторождения Жомарт	49
4. Методика исследований	54
4.1 Методика и техника проведения опытных сейсморазведочных исследований	54
4.2 Анализ результатов интерпретации сейсмических данных	59
4.3 Анализ данных по напряженно-деформированному состоянию массива вокруг горных выработок, полученные экспериментальными и аналитическими методами	66
4.4 Методика обработки данных сейсморазведки по получению распределения скорости продольной волны и акустического импеданса горном массиве	68
5. Результаты работ	71
5.1 Установление корреляционных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами и скоростными характеристиками горного массива	71
5.2 Корректировка полученных геомеханических параметров по результатам геофизических исследований скважин и обработки данных сейсморазведки на основе распределения скорости продольной волны и акустического импеданса горном массиве исследуемого участка рудника	81
Заключение	86
Обозначения и сокращения	88
Список использованной литературы	89

ВВЕДЕНИЕ

Тема: Изучение влияния зон напряженно-деформированного состояния горного массива в подземной выработке разрабатываемого рудного месторождения по геофизическим данным.

Целью проведения научно-исследовательских работ является изучение геомеханического состояния выработанного пространства при подземной добыче твердых полезных ископаемых на основе геофизических данных.

Основные задачи:

1 Сбор, обобщение и анализ полученных по результатам прошлых лет лабораторных исследований физико-механических статических и динамических характеристик горных пород (геомеханических) в горных массивах подземных выработок.

2 Изучение на основе обработки данных сейсморазведки распределения скорости продольной волны и акустического импеданса для получения упругих параметров горных пород в горном массиве исследуемого участка разрабатываемого месторождения.

3 Установление корреляционных зависимостей между геомеханическими и упругими параметрами горных пород, полученных по данным сейсморазведки.

4 Изучение геомеханических параметров по результатам комплексного анализа геомеханических свойств и геофизических исследований (ГИС, упругие свойства по сейсмическим данным) в горных массивах подземных выработок.

Актуальность исследований: На данный момент запасы месторождения Жомарт стремительно исчерпываются. Камерные запасы в значительной степени уже отработаны, а оставшиеся блоки характеризуются малой мощностью и бедностью руды. Возможности извлечения межкамерных целиков (МКЦ) из открытого пространства практически исчерпаны, в том числе из-за значительной неустойчивости кровли очистных камер. Капитальные штреки получили серьезные повреждения и требуют ремонта. Всё это обостряет геомеханическую ситуацию и требует научно обоснованного подхода к оценке устойчивости горных массивов.

При подземной разработке рудных месторождений особую опасность представляют природные структурно-литологические неоднородности, зоны тектонических нарушений, а также индуцированные техногенные процессы, которые инициируют разрушение массива. На месторождении Жомарт рудные залежи залегают на глубинах 500–800 м в тонкоплитчатых осадочных породах при высоком уровне тектонических напряжений. Прочность руды на сжатие составляет в среднем 160 МПа, однако прочность пород кровли и вмещающих пород существенно ниже, что обуславливает сложную геомеханическую обстановку.

Горно-геологические условия рудника Жомарт в 4 раза тяжелее, чем в Жезказганском регионе, из-за двукратного увеличения глубины отработки и вдвое меньшей прочности пород. Это обуславливает частое проявление горного давления — в 4 раза чаще, чем в Жезказгане. Основными причинами вывалов являются пересечение выработок с зонами тектонических нарушений и раздавливание кровли под действием напряжений. Кроме того, в породах продуктивных горизонтов развиты несколько систем трещиноватости, что дополнительно снижает устойчивость кровли и охранных целиков.

Особую опасность представляют участки с высокой концентрацией субвертикальных трещин, обводнённые зоны и области с повышенной деформацией кровли. Анализ состояния целиков на руднике «Жомарт-1» показывает их неустойчивость вследствие сложных геомеханических условий: слоистости, низкой прочности, трещиноватости, и недостаточной несущей способности.

С 2015 по 2019 годы наблюдалось значительное обострение геодинамической обстановки: фиксировались техногенные землетрясения интенсивностью до 6 баллов, ускоренное оседание земной поверхности, массовые обрушения кровли и разрушения межкамерных целиков. Так, к 2019 году в отработанных панелях было зарегистрировано более 800 вывалов и более 50 обрушений, что затронуло в сумме 46% площади очистных камер. Эти факты подтверждают несоответствие проектных параметров системы разработки фактическим условиям массива.

Проблема усугубляется при переходе к разработке фланговых участков залежи 4-I, что приводит к возрастанию напряженно-деформированного состояния в кровле и боковых частях камер, потере устойчивости основных конструктивных элементов системы и активизации процессов горного давления.

В этой связи выполнение задач по сбору, анализу и сопоставлению геофизических (сейсморазведка, ГИС) и геомеханических (статические и динамические прочностные параметры) данных приобретает особую значимость. Разработка и применение методики установления корреляционных зависимостей между скоростными характеристиками и физико-механическими параметрами массива позволяет построить более точные модели напряженно-деформированного состояния и выявить потенциально неустойчивые зоны.

Исследования направлены на решение ключевой практической задачи — повышение промышленной безопасности и эффективности подземной добычи за счёт научно обоснованного прогноза поведения массива. Его результаты могут быть использованы для корректировки проектных параметров системы разработки, выбора безопасных направлений проходки и своевременного укрепления опасных участков.

Объект исследований: горный массив локального участка рудника Жомарт, расположенный в Жанаркинском районе Улытауской области,

разрабатываемый камерно-столбовым подземным способом.

Методика исследований. Методика исследований включает следующие виды работ:

1 Сбор, обобщение и анализ результатов работ по определению физико-механических статических и динамических характеристик горных пород участка исследований

2 Сбор, обобщение и анализ результатов сейсморазведочных работ и ГИС.

3 Обработка и интерпретация геофизических данных и определение упругих характеристик (скоростей продольных волн V_p и объемной плотности ρ) целевых толщ.

4 Комплексный анализ результатов сейсморазведки и геомеханических исследований для оценки состояния выработанного пространства при подземной отработке рудных горизонтов.

Результаты исследований. Проведен комплексный анализ геомеханических и геофизических параметров для оценки текущей структурно-литологической неоднородности и техногенных осложнений при разработке рудных месторождений подземным способом. Разработана методика комплексного анализа геофизических и геомеханических параметров для оценки состояния массива, выявления потенциально неустойчивых зон и уточнения параметров разработки.

Новизна и научная значимость исследований заключается в научном обосновании и разработке технологии комплексного анализа геомеханических и геофизических данных для выделения зон с различными физико-механическими свойствами в выработанном пространстве и продуктивных пластах разрабатываемого рудника. Успешное решение задачи локализации неоднородностей методами сейсморазведки обеспечит эффективность последующего контроля за взаимодействием их с выработанным пространством.

Практическая значимость заключается в разработке методики определения прочностных свойств пород для построения геолого-геомеханической модели горных массивов с использованием современной сейсморазведки. Это позволит компаниям, ведущим подземную добычу твёрдых полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях, более эффективно проектировать системы разработки, повышать процент извлечения руды и решать задачи обеспечения промышленной безопасности. Методика может быть применена на любом рудном месторождении, особенно там, где существует риск подработки опасных участков массива.

Личный вклад. Автором собран и проанализирован фактический материал по геомеханическим и геофизическим параметрам массива рудника Жомарт. Проведена переобработка и интерпретация сейсморазведочных данных, расчёт упругих параметров и установление корреляционных связей между статическими и динамическими характеристиками пород. Корректировка полученных геомеханических параметров осуществлялась по

результатам геофизических исследований скважин и обработки данных сейсморазведки на основе распределения скорости продольной волны и акустического импеданса в горном массиве исследуемого участка рудника.

В рамках выполнения диссертационной работы автор принимал активное участие в научном проекте АР19680360 ИРН «Моделирование напряженно-деформационного состояния горных массивов при разработке рудных месторождений на основе комплексных геомеханических и геофизических исследований». Отдельной задачей было изучение геомеханических свойств горных пород и горных массивов. В рамках работы проводился анализ результатов сейсморазведки, расчёт упругих и прочностных характеристик, установление корреляционных зависимостей между статическими и динамическими параметрами.

В процессе научно-исследовательской практики в сервисной компании ТОО «Сейсм-А», автор активно участвовал в работах по анализу и переобработке полевых сейсмических данных по исследуемому участку.

По результатам научных опубликована научная статьи «The Effectiveness of the Use of Geophysical Research in the Underground Development of Ore Deposits», в журнале «Engineering Journal of Satbayev University», выпуск 146(4), на страницах 24–33.

В 2024 году был участником Международной научно-технической конференции, проходившей в г. Ташкент (ТашГТУ), где выступил соавтором доклада по теме «Применение сейсморазведки при разработке рудных месторождений подземным способом». Работа была представлена в материалах конференции (508 стр.)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук Истекова С.А., которому автор выражает глубокую благодарность.

Диссертация состоит из «Введения», 5 глав и «Заключения», содержит ... стр. (из них – ... стр. основного текста, сопровождаемого ... рисунками и ... таблицами), список литературы включает в себя ... наименований

1 Возможности применения геофизических методов при мониторинге подземной разработки рудных месторождений

1.1 Теоретические основы применения геофизических методов при контроле за разработкой рудных месторождений

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений невозможно без комплексного анализа его механических свойств. Упругие и геомеханические параметры породы являются ключевыми характеристиками, определяющими её поведение под действием естественных и техногенных нагрузок. Эти параметры лежат в основе численного моделирования, анализа устойчивости выработок и интерпретации геофизических данных, позволяя осуществлять непрямой контроль за состоянием массива [1].

Упругие свойства описывают способность породы возвращаться в исходное состояние после снятия внешней нагрузки.

Модуль Юнга или модуль упругости (E , Н/м²) - характеризует способность вещества сопротивляться растяжению или сжатию при упругой деформации. Он показывает, насколько сильно удлиняется или укорачивается образец при заданной нагрузке. Чем выше значение модуля Юнга, тем более жёсткий материал. Этот параметр играет ключевую роль в расчетах прогибов, деформаций и напряжений в массиве при действии вертикальных и горизонтальных нагрузок.

Модуль сдвига (G , Н/м²) - отражает сопротивление вещества сдвиговым нагрузкам при упругой деформации. Он определяет, насколько сильно материал сопротивляется изменению формы при приложении касательных напряжений. Величина модуля сдвига напрямую влияет на скорость распространения поперечных волн в сейсморазведке [2].

Модуль всестороннего сжатия (K , Н/м²) - характеризует способность породы сопротивляться объемному изменению (всестороннему сжатию). Этот параметр особенно важен для оценки поведения пород на больших глубинах, где действуют значительные гидростатические давления. Модуль сжатия влияет на скорость распространения продольных волн и позволяет оценивать уплотнение и пористость пород.

Коэффициент Пуассона (μ , безразмерный) - описывает соотношение между поперечным расширением и продольным сжатием материала при деформации [3]. Он показывает, во сколько раз изменяется поперечное сечение тела при его растяжении или сжатии вдоль одной оси. Значение коэффициента Пуассона варьируется в диапазоне от 0 до 0,5: более высокие значения указывают на большую пластичность и склонность к объемному расширению.

Совокупность указанных параметров позволяет получить полное представление о реакции массива на действующие нагрузки. Упругие константы широко используются при интерпретации данных

сейсморазведки, так как скорости волн напрямую связаны с модулями упругости и плотностью пород [4].

Геомеханические свойства определяют пределы прочности пород и их поведение при превышении упругого диапазона деформаций [5].

Предел прочности при одноосном сжатии (UCS, Uniaxial Compressive Strength, МПа) - характеризует максимальное вертикальное напряжение, которое может выдержать образец породы цилиндрической формы без бокового обжатия до момента разрушения. Этот параметр широко используется для оценки несущей способности пород, а также для расчёта устойчивости выработок. UCS является основным критерием прочности при проектировании крепей, армирования и буровзрывных работ.

Предел прочности при растяжении (UTS, Ultimate Tensile Strength, МПа) - отражает способность горной породы сопротивляться разрушению при растягивающих напряжениях. В отличие от сжатия, горные породы имеют значительно меньшую прочность на растяжение, поскольку внутренние связи между частицами нарушаются быстрее при таких нагрузках. UTS необходим для оценки риска образования трещин и разрушения висячем блоке или кровле выработок.

Показатель качества породы (RQD, Rock Quality Designation, %) - количественно характеризует степень трещиноватости породы на основе бурового керна. Определяется как процентное отношение суммарной длины кусков керна длиной более 10 см к общей длине колонны керна. Значения RQD выше 75% свидетельствуют о хорошем состоянии массива, 50–75% — удовлетворительном, менее 50% — о слабом, нарушенном массиве.

Этот показатель используется при классификации инженерно-геологических условий [36].

Модуль деформации (касательный) на пределе упругости (D_y , ГПа) - определяется как тангенс угла наклона касательной к начальному (упругому) участку диаграммы «напряжение–деформация». Он показывает жёсткость породы в пределах упругих деформаций и служит индикатором сопротивления породы малым нагрузкам. Модуль D_y тесно связан с модулем Юнга и участвует в оценке упругих реакций породы на действующие напряжения [5].

Модуль деформации (секущий) на пределе прочности ($D_{пр}$, ГПа) - определяется как тангенс угла наклона прямой, соединяющей начало координат с точкой разрушения на диаграмме «напряжение–деформация». Этот модуль показывает общее сопротивление породы на всём протяжении до момента разрушения. Он учитывает как упругие, так и пластические деформации и отражает прочностные характеристики массива в целом.

Модуль спада (M , ГПа) - рассчитывается по нисходящему участку диаграммы «напряжение–деформация» после достижения предела прочности. Он отражает снижение сопротивления породы после разрушения и характеризует её хрупкость, склонность к лавинообразному обрушению.

Модуль спада широко используется для анализа поведения массива после утраты устойчивости и для оценки риска вторичных деформаций.

Таким образом, совокупность упругих и геомеханических параметров образует фундамент для построения геомеханических моделей и количественной интерпретации геофизических данных. В дальнейшем они служат опорной основой при анализе распределения напряжений, идентификации зон потенциальной нестабильности и формировании прогноза поведения горных пород при подземной разработке [5, 6].

Подземная разработка рудных месторождений требует высокого уровня контроля за состоянием рудовмещающего массива, особенно в условиях техногенного воздействия. В этой связи важнейшим инструментом повышения эффективности добычи и обеспечения геомеханической стабильности выступает геофизический мониторинг геотехнологических процессов. Он позволяет выявлять зоны напряжений, контролировать деформации массива и оперативно реагировать на потенциальные угрозы.

Геофизические методы обеспечивают сбор объективных данных о физических свойствах недр, распространении волн, деформациях и изменениях в структурах, недоступных для прямого наблюдения. Их использование направлено на снижение рисков при разработке, оптимизацию горнотехнических решений и повышение полноты извлечения полезных ископаемых [7].

Геомеханическое поведение массива при подземной добыче определяется как его природными свойствами, так и воздействием горных работ. Фундаментальную роль играет гравитация, так как большинство технологий основаны на обрушении пород под её действием. Величина и распределение гравитационного поля Земли оказывают влияние на напряжённо-деформированное состояние массива, а его нарушение вызывает техногенные сейсмические явления.

Подземная добыча руд невозможна без точного геофизического мониторинга, который помогает контролировать процессы в массиве и повышать эффективность работ. Для этого используют методы, основанные на изучении гравитационного, магнитного, электрического и теплового полей. В горной практике применяются как классические, так и современные технологии — сейсмология, гравиметрия, геоэлектрика, геотермия и акустический анализ массива [8].

Сейсмологические методы играют важную роль в разработке месторождений: они позволяют строить модель массива и прогнозировать его поведение под нагрузкой. Регистрация волн от искусственных источников помогает учитывать неоднородности, оптимизировать параметры взрывных работ и выбирать способы погашения выработанного пространства. Сейсмоакустическое прозвучивание, основанное на пьезоэлектрическом эффекте, использует импульсы с частотой 70–100 Гц, обеспечивая прозвучивание до 200 м (рисунок 1.1). Непрерывный

мониторинг акустической эмиссии служит средством раннего предупреждения о динамических явлениях и горных ударах [8].

Изменения в горном массиве при его разработке контролируются приборами, использующими пьезоэлектрический эффект. Они регистрируют звуковые и ультразвуковые колебания, а также слабые сигналы акустической эмиссии, возникающие при подготовке к разрушениям. Для возбуждения упругих волн применяются взрывы, вибраторы и импульсные источники. Сигналы фиксируются сейсмоприёмниками или пьезогеофонами, чувствительными к давлению и движению. Анализ распространения волн позволяет оценить состояние массива. Постоянный мониторинг помогает своевременно выявлять зоны риска и повышать безопасность горных работ.

Примером практического применения пьезоэлектрического подхода может служить исследование в южной части Израиля [9]. Там проводились наблюдения за областью, где под слоями аллювиальных отложений залегает золотиносный кварц. При этом расстояние между источником возбуждения колебаний и измерительными электродами составляло около 5 метров (рисунок 1.2).

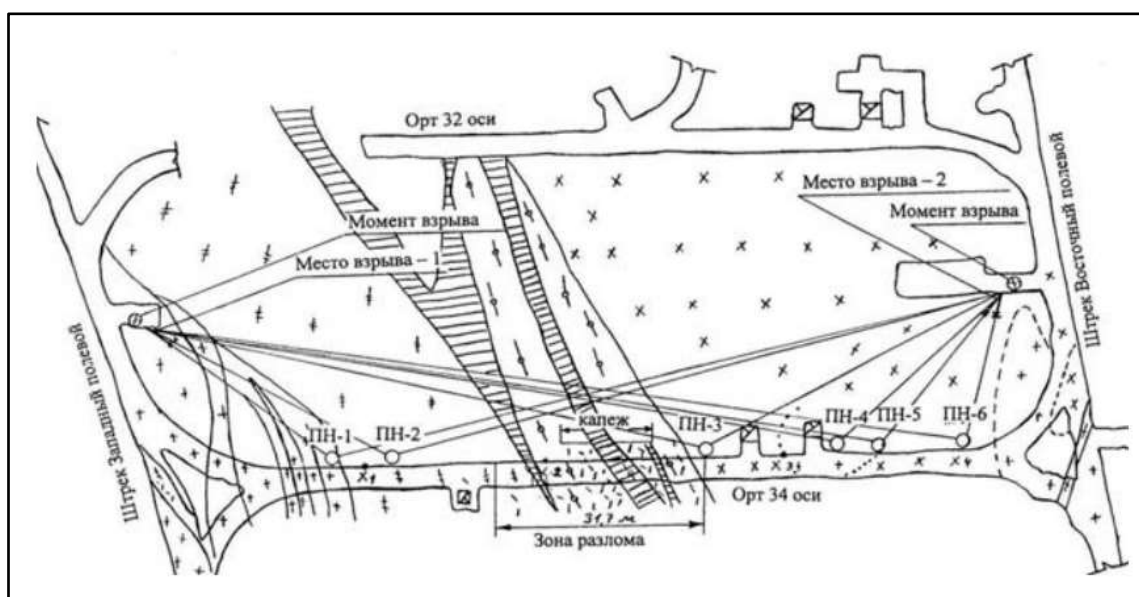


Рисунок 1.1 – Схема сейсмоакустического прозвучивания [8]

Акустические свойства горных пород зависят от их плотности, прочности и структуры. В более плотных и глубокозалегающих породах звуковые волны распространяются быстрее. В скальных породах затухание волн невелико — $0,05\text{--}1\text{ м}^{-1}$ при частотах $1\text{--}100\text{ Гц}$, в рыхлых — выше: $0,01\text{--}0,1\text{ м}^{-1}$. Скорость продольных волн варьируется: в магматических — $4500\text{--}6800\text{ м/с}$, метаморфических — $4000\text{--}5600\text{ м/с}$, осадочных — $3200\text{--}5500\text{ м/с}$, в рыхлых грунтах — $300\text{--}1900\text{ м/с}$.

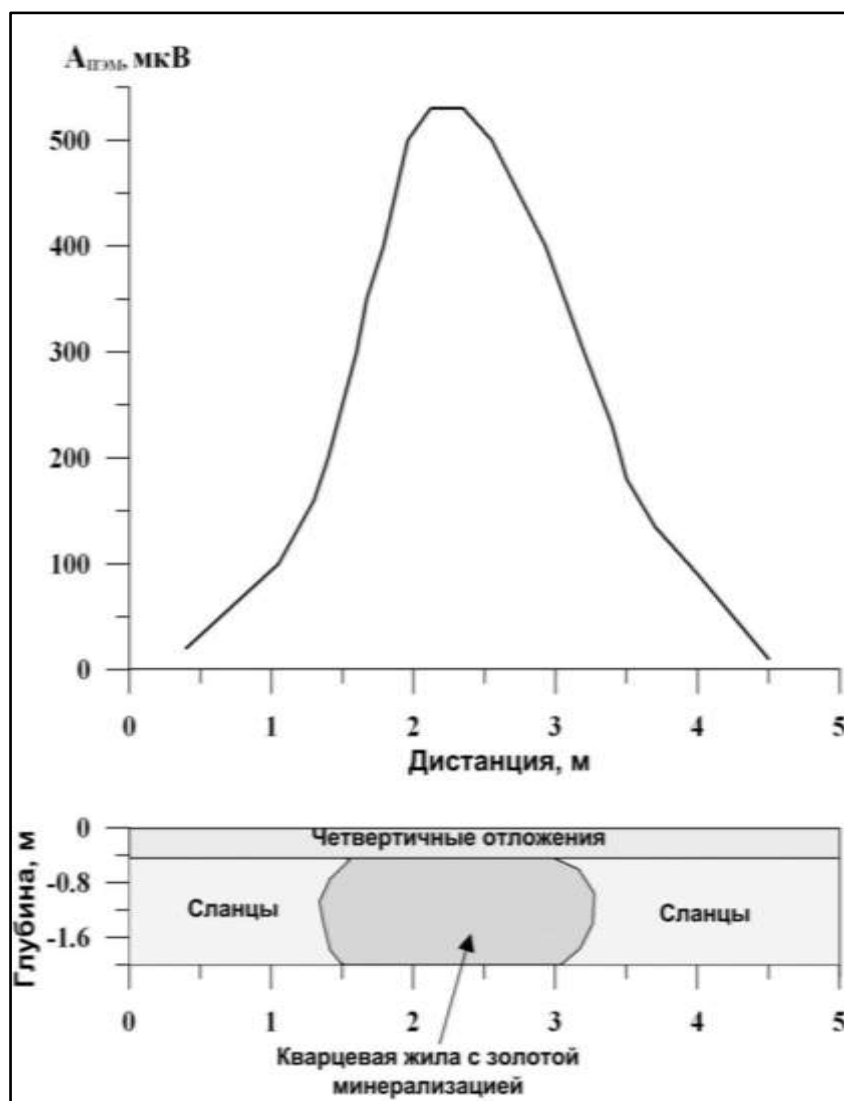


Рисунок 1.2 – Пьезоэлектрические наблюдения над зоной золотоносного кварца, залегающего под аллювиальными отложениями (южный Израиль) [9]

Ядерно-геофизические методы, основанные на взаимодействии излучений с породами, применяются для анализа состава руд, структуры геологических тел и контроля разработки месторождений. Радиоактивные изотопы и нейтронное зондирование позволяют получить информацию о концентрации полезных компонентов, пористости, влажности и других критически важных параметрах в режиме реального времени.

Таким образом, применение геофизических методов при подземной разработке рудных месторождений обеспечивает комплексный подход к исследованию, мониторингу и управлению состоянием горного массива. В условиях высокой технической и экономической сложности добычи минерального сырья эти методы становятся основой научно обоснованного проектирования и безопасного ведения работ.

В качестве примера эффективного применения комплекса сейсморазведочных методов можно привести исследования, выполненные в районе шахтных полей Верхнекамского месторождения калийных солей, где фиксировались случаи ускоренного оседания и провалов земной поверхности. Для выявления потенциально опасных зон, нарушающих целостность водозащитной толщи и создающих угрозу затопления рудников, использовались методы наземной и скважинной сейсморазведки, включая метод общей глубинной точки (МОГТ), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) и межскважинное сейсмоакустическое просвечивание [10].

Применение МОГТ позволило выявить аномальные участки в верхней части разреза, характеризующиеся нарушением синфазности отражающих горизонтов, изменением амплитудных и частотных характеристик, что указывает на наличие зон трещиноватости и ослабления массива. Эти участки фиксировались преимущественно в пределах ранее установленных зон ускоренного оседания, где по данным геодезического мониторинга величина вертикальных смещений достигала до 5 м за 10 лет. Наземные данные дополнялись профилями многоканального анализа поверхностных волн (MASW), что позволило получить карты распределения скоростей поперечных волн и параметры поглощения энергии Рэлеевских волн.

Для уточнения структуры массива и определения параметров в глубинной зоне использовался метод ВСП в обратной геометрии, при котором источник сигнала размещался в скважине, а приёмники — на поверхности. Это позволило значительно повысить вертикальную разрешающую способность и построить детальные разрезы скоростей продольных волн. Выявленные на этих разрезах зоны низких скоростей, локализованные на глубинах до 20–25 м, хорошо коррелировали с литологическими колонками и, по-видимому, соответствовали слабоуплотнённым породам палеовреза или зонам трещиноватости (рисунок 1.3). В некоторых случаях фиксировались резкие вертикальные границы между плотными известняками и дресвянистыми осадками, насыщенными водой, что указывало на потенциальные каналы фильтрации [11].

Особое значение в работе имело межскважинное сейсмоакустическое просвечивание, выполненное между двумя скважинами, пробуренными в зоне аномального оседания. Этот метод обеспечил получение осреднённых скоростных разрезов, подтверждающих наличие субвертикальных зон пониженной скорости. Наличие высокой корреляции между данными, полученными с использованием различных источников и систем регистрации, позволило считать полученные результаты достоверными. На разрезах, построенных по данным межскважинного просвечивания, чётко прослеживались переходы между плотными и слабыми слоями, что согласовывалось с литологической моделью массива (рисунок 1.4).

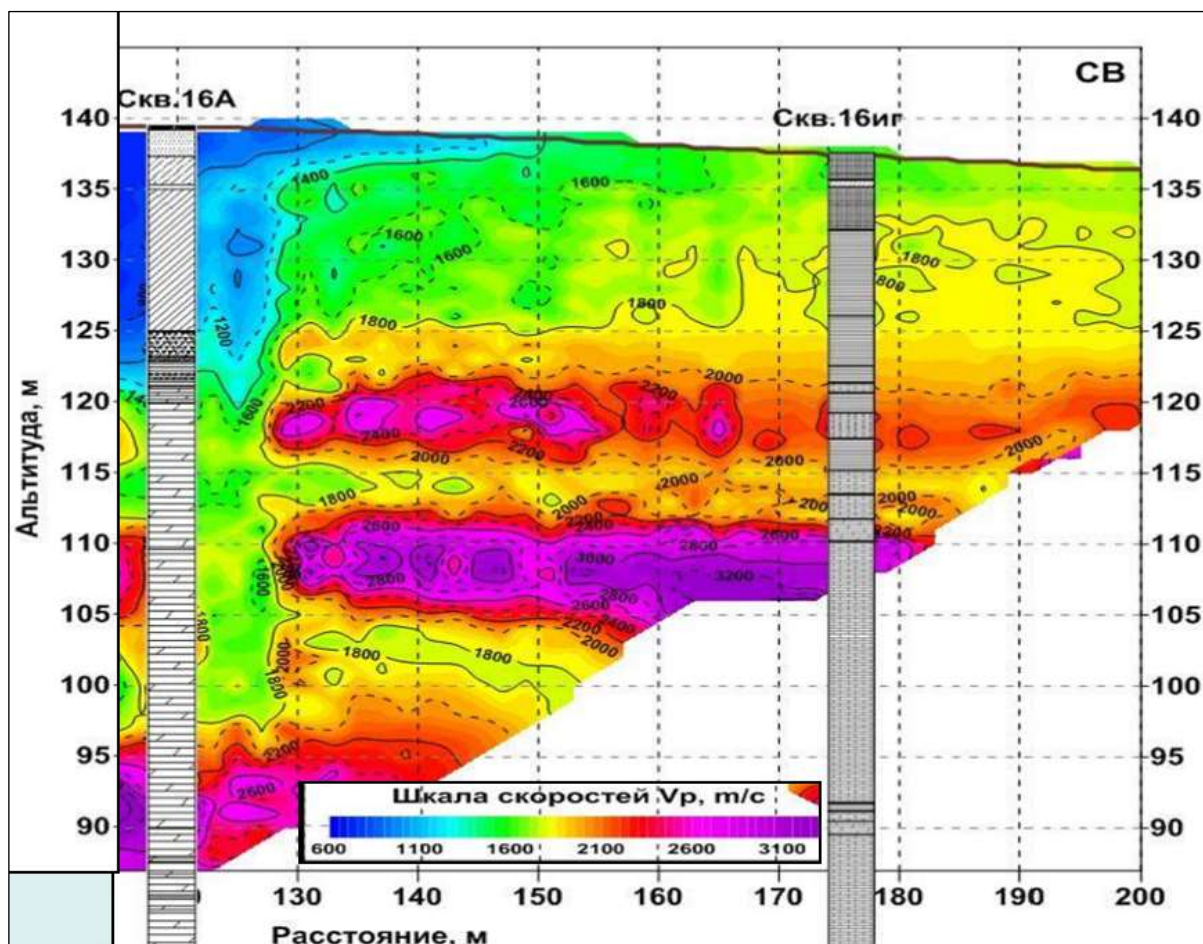


Рисунок 1.3 – Сопоставление разреза скоростей продольных волн по данным ВСП вдоль профиля 1 с литологическими колонками по скважинам [11]

На основании комплексной интерпретации сейсморазведочных данных было сделано заключение, что формирование зоны ускоренного оседания связано не только с влиянием горных работ, но и с геологическим строением — в частности, наличием древнего палеовреза, заполненного слабыми грунтами, где активно развивались процессы выветривания и трещинообразования. Применение сочетания МОГТ, ВСП и межскважинного просвечивания позволило не только локализовать аномалии, но и охарактеризовать их геометрические параметры, выявить вертикальные границы и глубинное строение слабоуплотнённых зон, что делает данный подход особенно ценным для прогноза техногенных деформаций и оценки устойчивости массива.

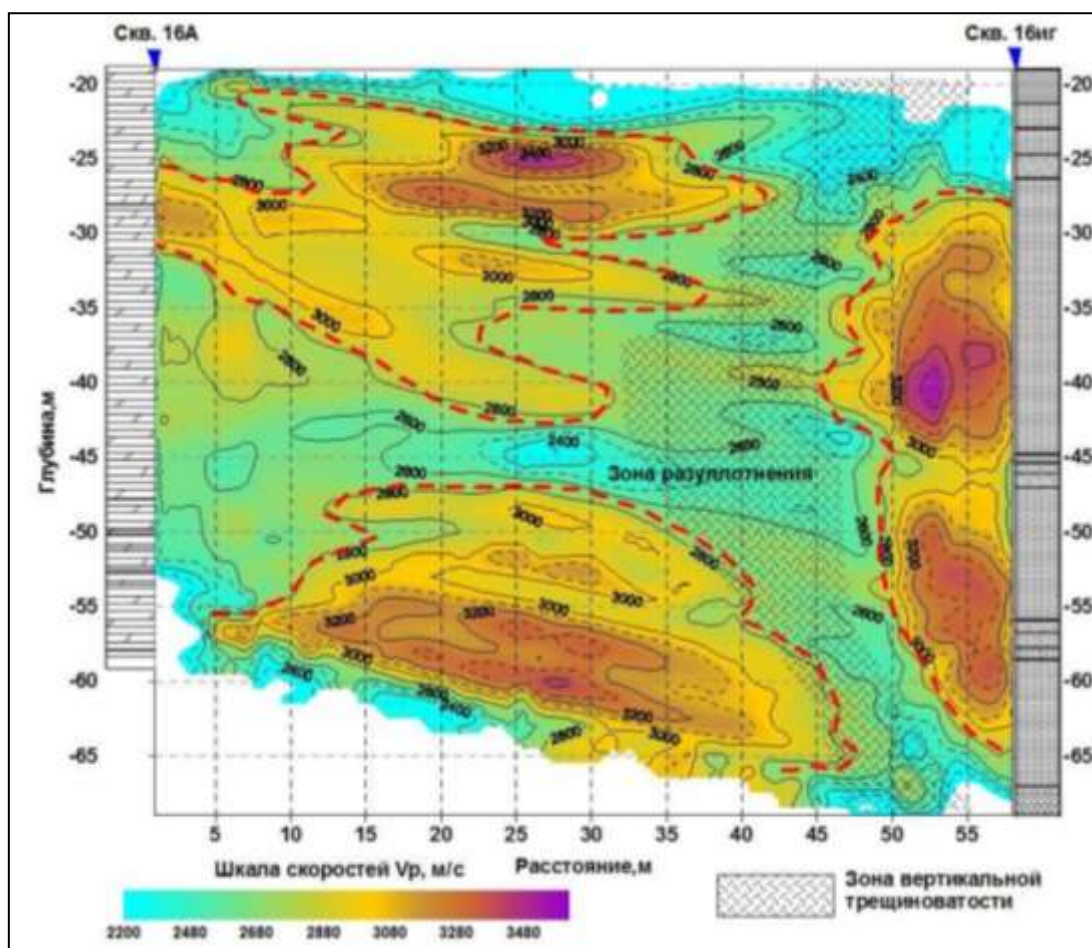


Рисунок 1.4 – Сопоставление разреза скоростей продольных волн по данным межскважинного просвечивания с литологическими колонками по скважинам [11]

1.2 Обзор и анализ современных отечественных и зарубежных методов оценки текущего геомеханического состояния рудных месторождений и связанных с этим проблем

Современные методы оценки геомеханического состояния рудных месторождений представляют собой основу для рационального, безопасного и контролируемого ведения подземных горных работ [37]. В связи с растущей сложностью геологических условий и глубиной разработки месторождений всё большее значение приобретают дистанционные методы наблюдения, позволяющие детально оценить напряжённо-деформированное состояние (НДС) массива. Особое место в этом направлении занимают геофизические технологии, как отечественного, так и зарубежного происхождения, объединённые общей задачей — выделения опасных зон в пределах рудного тела, кровли и выработанного пространства [12].

В одном из значимых отечественных примеров — шахте имени С.М. Кирова — была решена нетривиальная задача: определение параметров пробки из обломков породы в шахтном стволе, возникшей в результате аварийной ситуации [13]. Для этого был применён комплекс геофизических методов, включающий георадарное зондирование и спектральное сейсмопрофилирование. Георадар доказал свою высокую эффективность в условиях скальных пород: он позволил выделить зоны структурных нарушений, пустот и неоднородностей. Спектральное сейсмопрофилирование, основанное на анализе частотных характеристик упругих колебаний массива, подтвердило выводы георадара и продемонстрировало значительный потенциал при вертикальном зондировании (рисунок А.5).

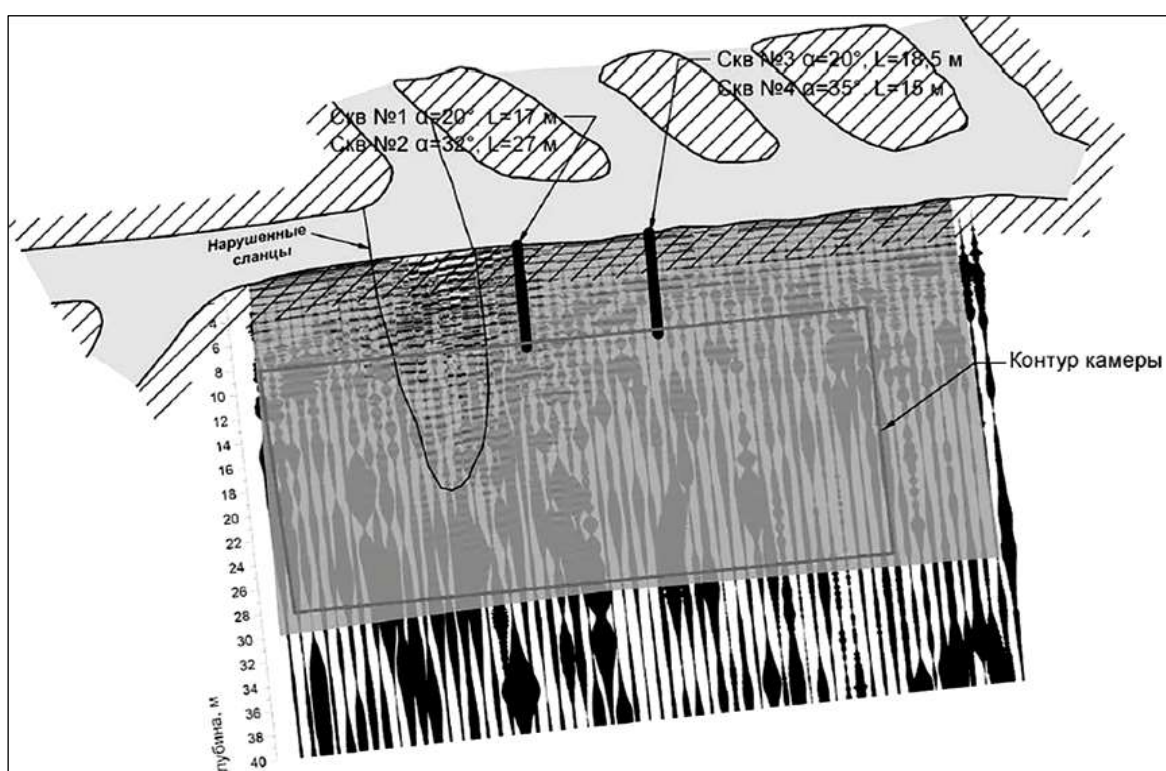


Рисунок 1.5 – Результаты геофизических исследований при поисках пустот в камерах методом спектрального сейсмического профилирования [13]

Ещё один случай связан с исследованием причины провала земной поверхности на этапе строительства шахтного ствола. Геофизические методы позволили выявить структурные изменения массива, вызванные антропогенным воздействием. Георадар зафиксировал нарушение целостности горных пород в зоне провала, совпадающее с данными спектрального анализа (рисунок 1.6). Вывод: активное разрушение массива завершено, дополнительных зон риска в пределах исследованной площадки не обнаружено [13].

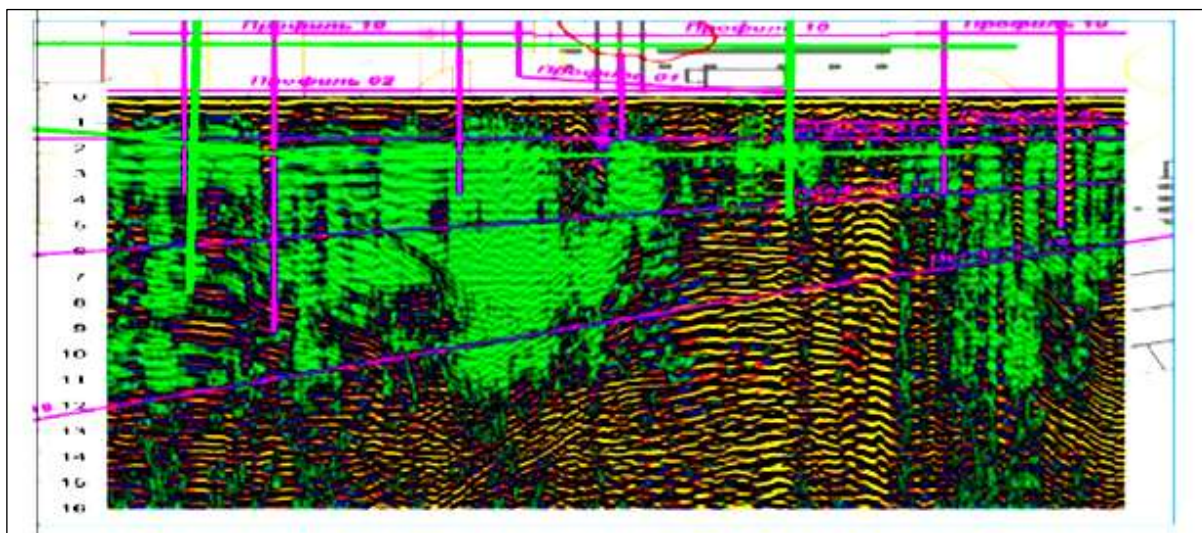


Рисунок 1.6 – Радиограмма в непосредственной близости от провала массива пород [13]

Отечественная система «МИКОН-ГЕО», разработанная УГГИ, применяется для дистанционного контроля напряжённо-деформированного состояния массива при подземной добыче. Метод основан на анализе отражённых сейсмических волн и позволяет выявлять опасные зоны на глубине до 100 м. Система успешно испытана на ряде рудных и угольных шахт. На рисунке 1.7 показано типичное сейсмическое изображение массива впереди забоя тоннеля с зонами опорного давления и дезинтеграции пород [14].

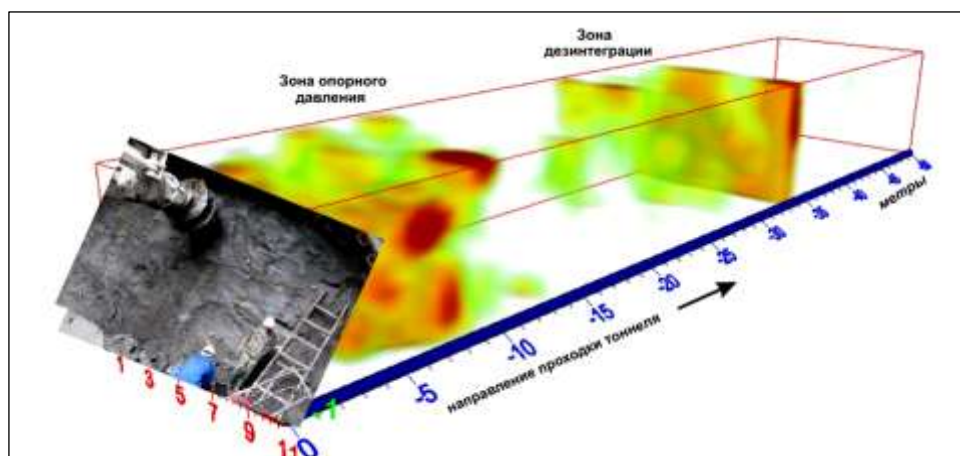


Рисунок 1.7 – Пространственное изображение оценок относительных значений градиента давления по данным сейсмолокационного обзора горного массива впереди забоя транспортного тоннеля [14]

Зарубежный опыт представлен практикой 4D-сейсморазведки, особенно успешно применяемой в Канаде. На месторождениях Крейтон и Гертруда с её помощью удалось отслеживать во времени изменения

геомеханического состояния рудных тел, выявляя границы между выработанными и нетронутыми участками по характеру рассеяния энергии сейсмического сигнала [15]. Сравнение синтетических и наблюдаемых разрезов показало высокую точность дифференциации рудного тела, что стало важным инструментом в планировании горных работ (рисунок 1.8).

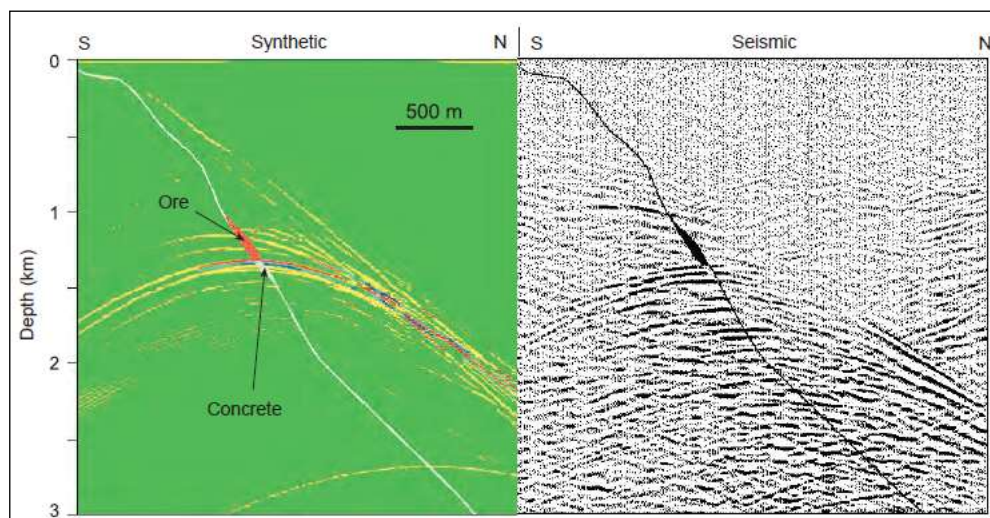


Рисунок 1.8 – Синтетические (слева) и наблюдаемые (справа) отражения от массивной сульфидной залежи месторождения Гертруды в Садбери (Milkereit et.al. 1996)

Таким образом, представленная совокупность примеров демонстрирует высокий потенциал современных геофизических методов для оценки текущего геомеханического состояния рудных месторождений. Их применение позволяет выявлять потенциально опасные зоны, управлять рисками, оптимизировать систему разработки и, главное, предотвращать аварии, сохраняя устойчивость как массивов, так и инженерной инфраструктуры.

2 Характеристика исходных данных

2.1 Общие сведения об объекте исследований

Медисто-песчаниковое месторождение Жомарт размещается на территории Жанааркинского района Карагандинской области Республики Казахстан, ориентировочно в 130 км юго-восточнее города Жезказган. В настоящее время его разработка осуществляется рудником «Жомарт», однако объемы извлекаемых запасов на данном участке близки к исчерпанию. Сообщение между месторождением и Жезказганом обеспечивается за счет асфальтированной автодороги протяженностью около 80 км и грейдерной дороги длиной около 100 км. Общая протяженность транспортного пути составляет 180 км, маршрут пролегает через населенный пункт Мыйбулак (см. рисунок 2.1).

Климатические условия региона формируются в рамках природной зоны полупустыни Бетпакдала, в которой он географически расположен.

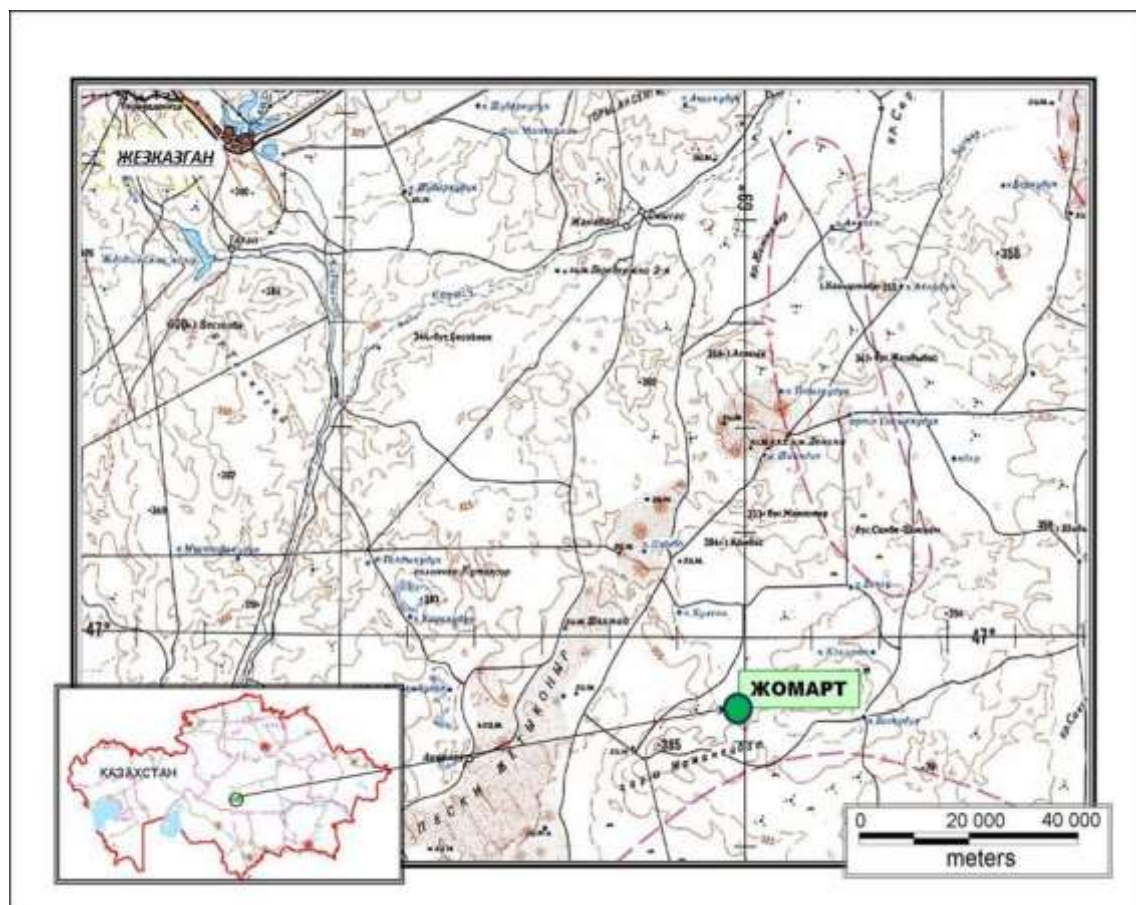


Рисунок 2.1 – Схематическая обзорная карта месторождения Жомарт

Климат района резко континентальный — мало осадков, жаркое лето и холодная зима с резкими температурными колебаниями. Средняя температура зимой около -13°C (до $-31,6^{\circ}\text{C}$), летом около $+24^{\circ}\text{C}$ (до

+41 °С), среднегодовая — 4,5 °С. Снег держится с ноября по март (иногда до апреля), в среднем 120–140 дней, высота покрова — 16,6–23,6 см. Ветры дуют круглый год, чаще с севера, северо-востока, востока и юго-запада, со средней скоростью 4,2 м/с; зимой возможны порывы до 27 м/с.

Минерализация приурочена к значительной линзообразной структуре, представленной серыми карбонатными породами, простирающейся примерно на 23 км при максимальной ширине до 1,55 км. Рудные тела имеют форму, близкую к пластовой, и размещаются на десяти стратиграфических горизонтах. Основные скопления медных, полиметаллических и свинцово-цинковых руд залегают преимущественно в прослоях серых песчаников и конгломератов, изредка встречаясь в алевроитах и мелкозернистых песчаниках.

На территории месторождения выявлено 35 рудных тел, относящихся к категории балансовых. Из них четыре отнесены к крупным, а одиннадцать — к средним по запасам. Мощность тел варьируется в пределах от 0,6 до 16,5 м. Залегание характеризуется пологим характером, контролируемым напластовой структурой пород-хозяев.

Основная часть промышленных запасов сосредоточена в пределах межформационных конгломератов, приуроченных к горизонту 4–I раймундовского рудного уровня, находящемуся на границе жезказганской и таскудукской свит. Здесь сосредоточено около 88,5 % балансовых медных руд и весь объём (100 %) комплексных руд. По простирацию рудные тела горизонта 4–I протягиваются на 14 км и постепенно погружаются: от 385 м на востоке до 675 м на западе и до 815 м в северных и северо-западных секторах месторождения [16].

Добыча на руднике «Жомарт» осуществляется буровзрывным методом с использованием панельно-столбовой системы. Согласно проекту, разработка разделена на два этапа. На первом этапе происходит извлечение камерных запасов панельно-столбовой системой с сохранением барьерных целиков, отрабатываемых от центра рудного тела к его флангам. Второй этап предусматривает ликвидацию образовавшихся пустот и последовательную выемку ранее оставленных целиков [38].

Технические параметры используемой системы разработки заключаются в следующем: ширина барьерных целиков составляет 40 метров при расстоянии между их осями 125 метров. Междукammerные целики размещаются по сетке 19 на 19 метров, а пролет каждой камеры достигает 9 метров.

2.2 Геолого-геофизическая изученность и краткое геологическое строение района работ

В 1977 г. Струтынским А.В. и Казимиром В.Т. подготовлены «Предложения на проведение геолого-геофизических работ на площади

восточного борта Жезказган-Сарысуйской впадины (в том числе Жаман-Айбатского поднятия)». В «Предложениях...», рекомендовано пробурить на Жаман-Айбатской структуре субширотный профиль из 6 скважин, глубиной 500-1200 м, с целью установления мощности сероцветных пород в продуктивной толще, выявления медной минерализации. Эти предложения были учтены при составлении «Проекта общих поисков месторождений меди на площади восточного борта Жезказган-Сарысуйской впадины на 1981-84 г.г.». Реализация этого проекта Жаман-Айбатской партией Жезказганской геологоразведочной экспедиции в 1981-84 г.г. (Скирда П.И. и др.) и привела к открытию месторождения. Детальные поиски были проведены в период 1984-87 г.г. (Гайдышев В.В., Скирда П.И.). В результате работ выявлена Северная залежь и фрагмент Восточной залежи.

С 1988 по 1996 г.г. на месторождении проводилась предварительная разведка и поисковые работы на флангах. Разведанные запасы получили положительную геолого-экономическую оценку. В 1997 г. Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых Республики Казахстан были утверждены кондиции для руд месторождения Жомарт (Протокол № 51-К ГКЗ РК от 27.01.97 г.).

В 2000 г. был составлен (Ужва В.И., Казимир В.Т. и др.) и рассмотрен ГКЗ РК «Отчёт о результатах разведки месторождения Жомарт с подсчётом запасов по состоянию на 15.03.1999 г.». Утвержденные запасы приведены в таблице 1.2.

В 2010-2012 г.г. на месторождении проведена доразведка месторождения силами ТОО «Казахмыс Эксплорэйшн», с целью перевода запасов категории C_2 в категорию C_1 и оценки флангов месторождения. За этот период на участках Западный, Центральный и Северный пробурено 383 разведочные скважины (255947,4 п.м.) и 16 геотехнических скважин (12585,20 п.м.). В связи с доразведкой месторождения, возникла необходимость в пересчете запасов медных руд по уточненным параметрам кондиций.

Геофизические исследования Джезказганской синклинали развивались поэтапно, охватывая несколько исторических периодов.

Первый этап (1926–1932 гг.) был представлен преимущественно электроразведочными работами в районе Центрального Джезказгана и частично на других объектах Джиландинской группы. Однако, ввиду отсутствия координатных привязок участков, последующая оценка и сопоставление с результатами бурения невозможны. Работы носили опытный характер и не дали полноценной геологической информации.

Второй этап (1955–1959 гг.) начался с опытно-методических и производственных геофизических исследований, проведённых Атасуйской геофизической экспедицией на ряде месторождений (Итауз, Сарыоба, Кипшакпай и др.). В рамках этого этапа Джезказганской ГФЭ были выполнены литогеохимические съёмки масштаба 1:10 000 на площади 175 км². Выявлены многочисленные ореолы рассеяния и рудопоявления меди,

однако чувствительность анализов была недостаточной, а дубликаты проб не сохранились, что привело к необходимости полной переинтерпретации этих участков в 1963–1964 гг.

Одновременно применялись методы комбинированного электропрофилирования и естественных потенциалов. Однако ввиду низкой электропроводности медистых руд и сильных помех, результаты оказались слабоинформативными. Положительным итогом стало установление западного падения слоёв в районе Итаузского месторождения. В 1955 г. начаты гравиметрические (АГФЭ) и сейсмические исследования (ИГН АН КазССР). Тем не менее, гравиметрия масштабов 1:200 000 и 1:50 000 оказалась недостаточно точной (погрешность превышала 0,4 мГал), и работы были повторены в более детальном масштабе (1:25 000–1:50 000). Сейсмические исследования (КМПВ до 4,5 км) проводились на известных объектах и позволили уточнить структуру, хотя глубина проникновения была ограничена. Несмотря на отдельные недостатки, работы этого этапа позволили выявить асимметрию синклинали, установить западное падение пород в рудном районе Итауз, локализовать более 20 рудопроявлений и уточнить структурные особенности синклинальной зоны.

Третий этап (1961–1964 гг.) отличался значительным расширением охвата территории и применением комплекса геофизических методов в более детальном масштабе (1:50 000 и 1:25 000). Были задействованы гравиразведка, сейсморазведка КМПВ (годографы до 18 км), методы РНП, ВЭЗ, ВП-СГ, СЭП, КЭП, а также литогеохимические исследования. Это обеспечило высокую степень детализации геологического разреза. Наиболее перспективные участки (Кусмурун-72, Карашошак-67 и др.) были переданы Джезказганской ГРЭ для бурового опробования.

В этот период возникла необходимость в комплексной систематизации геофизических данных (гравиметрия, сейсмика, электроразведка, геохимия), в чём активно участвовали специалисты: Дурбицкий Б.Н., Котлярова В.Е., Котляров А.М. и другие. Исследования южной части Сарыобинской антиклинали (восток Кокдомбакского блока) выявили сложное строение, по данным РНП предполагается возможность мелкого залегания продуктивных пластов, в связи с чем рекомендовано бурение профиля из 3–5 скважин глубиной 500–1000 м.

Также следует отметить исследования ИГН АН КазССР (Казанли Д.Н., Уразаев Б.М., Альмуханбетов Д.А., Гульницкий В.Л. и др.), включающие гравиразведку, магниторазведку, электроразведку и петрофизику. Они позволили уточнить глубинное строение синклинали, выявить скрытые тектонические нарушения и изучить физические свойства пород.

Четвёртый этап (с 1975 г.) начался с проведения сейсморазведочных работ методом МОВ, инициированных Джезказганской ГРЭ. Основной задачей было изучение внутренней структуры синклинали до глубины 3000 м и мощности каменноугольных продуктивных толщ [16].

В геологическом строении исследуемого района участвуют породы, сформировавшиеся в пределах среднего и верхнего палеозоя, а также кайнозойские отложения. Среди палеозойских формаций преобладают осадочные образования каменноугольной системы, которые широко распространены в западной, северной и восточной частях синклинали. Турнейские и визейские отложения характеризуются чередованием карбонатных и терригенных пород: известняков, песчаников, алевролитов и аргиллитов. Серпуховский ярус (белеутинский горизонт) выходит на поверхность на севере синклинали, где он представлен переслаиванием зеленовато-серых песчаников, темносерых алевролитов и аргиллитов, конгломератов и известняков с фауной серпуховского возраста. Мощность отдельных слоёв варьирует от 5 до 30 метров, достигая максимумов в 300 м на Сарыобинском и 500 м на Итаузском месторождениях. Граница с вышележащей таскудукской свитой условно проводится по устойчивому слою пятнистых алевролитов.

Между этой границей и верхними известняками, содержащими фауну брахиопод, выделены три рудоносных горизонта: Копкудукский, Джиландинский и Промежуточный. Они характеризуются медной минерализацией, наличием вкраплённости пирита, блеклых руд, галенита и арсенопирита, преимущественно в серых песчаниках, конгломератах и зонах дробления с жильными кварцем и кальцитом. Наиболее обогащённые скопления пирита и арсенопирита наблюдаются в алевролитах [17].

В комплексе нерасчленённых верхне-серпуховских и среднекаменноугольных отложений выделяются две свиты: нижняя таскудукская и верхняя джезказганская, обе обладающие признаками меденосности. Таскудукская свита распространена в западной, северной и восточной частях синклинали, где она обнажается в виде вытянутых полос. Её породы — песчано-глинистые — залегают на серпуховских отложениях без углового несогласия. Нижняя граница проводится по слою М1, а верхняя — по конгломератам "раймундовского" типа.

В разрезе таскудукской свиты прослеживаются три рудоносных горизонта (рисунок 2.2). Первый — таскудукский — залегает в основании и сложен серыми и темно-серыми песчаниками, содержащими медную минерализацию, прослоями алевролитов и конгломератов; его мощность составляет 60–80 м. Он служит основным продуктивным горизонтом Джиландинской группы месторождений. Второй — "златоустовский" — включает бурые и серые песчаники с алевролитами и аргиллитами, в верхней части которого находятся устойчивые роговики, являющиеся стратиграфическим ориентиром. В некоторых местах выявлена рудная минерализация; мощность горизонта достигает 150–200 м. Третий — "покровский" — состоит из бурых и серых песчаников с прослоями алевролитов и конгломератов, но рудные тела в нём отсутствуют; его мощность — 100–120 м.

Джезказганская свита представлена красноцветными песчано-глинистыми породами и обнажается преимущественно в центральной и восточной частях синклинали. От подстилающих отложений она отделена "раймундовскими" конгломератами. В свите прослеживаются шесть горизонтов: нижний, средний и верхний "раймунды", "крестовский", "анненский" и "акчийокий". Первые три сложены чередующимися песчаниками, алевролитами и конгломератами, мощностью 75–200 м. Верхние горизонты включают бурые и серовато-бурые песчаники, алевролиты и линзы буровато-серых песчаников общей мощностью 300–350 м. Несмотря на наличие песчаников, рудная минерализация в этих горизонтах отсутствует. Общая мощность джезказганской свиты составляет 400–550 м.

В пределах Жиландинской группы наблюдаются фациальные переходы таскудукской и джезказганской свит в красноцветные разновидности. Продуктивные серые песчаники и конгломераты, равно как и кремнистые известняки, играют подчинённую роль. Конгломераты делятся на два типа: внутриформационные (состоящие из гальки песчаников и алевролитов, цементированной красным песчаником) и межформационные "раймундовские", включающие обломки изверженных пород, кварцитов, роговиков и кремнистых известняков.

Сероцветные песчаники в пределах синклинали распределяются закономерно. На севере они встречаются в нижней части таскудукской свиты, а также в горизонтах джиландинском, промежуточном и копкудукском. На юге — также и в пределах джезказганской свиты до горизонта №9. В центральной зоне они залегают на глубине 1400–1600 м, при мощности до 80 м [17].

Отложения пермской системы представлены жиделисайской свитой, залегающей на джезказганской свите и состоящей из малиново-красных песчаников и алевролитов. Рудоносность отсутствует, а мощность свиты достигает 550 м. Кенгирская свита, представленная мергелями, глинистыми и обломочными известняками, а также известковистыми алевролитами и песчаниками, достигает мощности 1100–1200 м и также безрудная.

Кайнозой представлен палеогеновыми и неогеновыми отложениями. Акчийская свита (верхний эоцен – нижний олигоцен) состоит из белых глин, глинистых песков, гравелистых песчаников и железистых конгломератов, достигает 65 м.

Неогеновые образования представлены аральской, джиландинской и павлодарской свитами, сложенными зелёными гипсоносными глинами и песчано-галечными отложениями. Мощности: аральская — до 60 м, джиландинская — 50 м, павлодарская — 15 м.

Четвертичные отложения, охватывающие весь район, представлены галечниками, глинами и суглинками мощностью до 2–5 м. Полезные ископаемые в кайнозойских и четвертичных отложениях не зафиксированы.

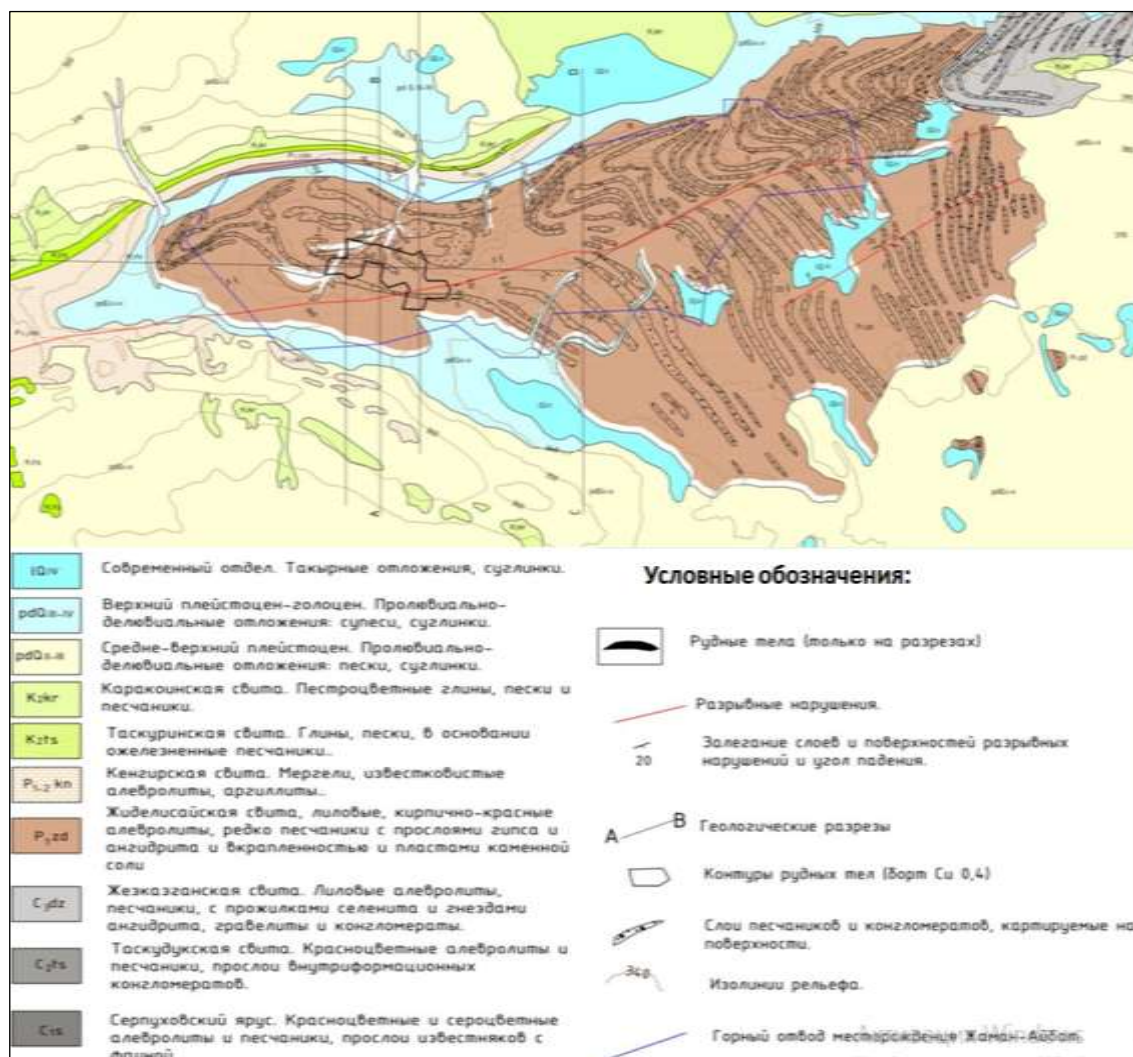


Рисунок 2.2 – Геологическая карта рудника Жомарт (АО «Жезказгангеология»)

Рудное поле месторождения расположено на восточной части Жезказгано-Сарысуйской впадины, сформированной в герцинскую тектоническую эпоху. Геологический разрез впадины представлен осадочными породами, сформировавшимися в различных фациальных условиях: в лагунах, дельтах и озёрных системах. Эти осадки относятся к верхнему девону, каменноугольной системе и пермскому периоду и имеют преимущественно красноцветную и пестроцветную окраску. Характерными чертами строения комплекса пород являются широкие брахиформные складки, признаки соляной тектоники и единая структура с почти непрерывным стратиграфическим разрезом.

В пределах нижнепермских отложений, представленных жиделисайской свитой, сформировались значительные запасы галита. Кроме того, в прибрежно-дельтовых породах обнаружены месторождения медистых песчанников, типичных для жезказганского типа, а также стронциевые залежи, возникшие в результате метасоматических процессов.

Активные тектонические процессы, происходившие в среднем карбоне, послужили причиной формирования герцинской складчатости и крупных геологических структур. Именно тогда произошло образование Сарысу-Тенизского поднятия, что привело к разобщению ранее единой Жезказган-Тенизской осадочной области на три обособленные впадины: Жезказгано-Сарысуйскую, Тенизскую и Шубаркольскую.

Жезказгано-Сарысуйская впадина в центральной и краевой зонах характеризуется сложной тектонической структурой, представленной линейными субширотными складками, флексурными нарушениями и купольными поднятиями. В пределах исследуемого участка была выделена Жаман-Айбатская антиклинальная структура, центральная часть которой (ядро) сформирована породами таскудукской и жезказганской свит. Крылья антиклинали сложены отложениями жиделисайской, кингирской свит, а также породами верхнемелового возраста. На северном фланге антиклинали зафиксировано нарушение — Азатская флексура, ориентированная в северо-восточном направлении. Вдоль этой флексуры произошло смещение северного блока в нисходящем направлении. В пределах зоны флексуры наблюдается наклонное залегание пород — от таскудукской свиты до верхнемеловых отложений. Вершинная часть Жаман-Айбатской антиклинали имеет форму вытянутой линейной складки субширотного направления с выраженной асимметрией. Её осевая линия постепенно понижается в западном направлении. В пределах западного участка этой структуры прослеживается антиклиналь более мелкого порядка — Таскуринская, которая по своему типу является классической брахиформной формой и включает в себя два купола. Один из них, западный купол, приурочен к месторождению Таскура (см. рисунок 2.3).

На размытом основании верхнепалеозойских отложений залегают рыхлые и слабо сцементированные осадочные породы, относящиеся к верхнемеловому, палеогеновому и четвертичному возрасту.

Месторождения медистых песчаников жезказганского типа характеризуются чёткой стратиграфической приуроченностью рудных тел к горизонтам серых песчаников, входящих в состав жезказганской и таскудукской свит.

К северной (Жиландинской) группе месторождений относятся такие участки, как Сары-Оба, Итауз, Кипшакпай, Карашошак, а также проявление Копкудук. Все они расположены в пределах северного крыла Жезказганской синклинальной структуры. Минерализация здесь преимущественно ассоциируется с нижнетаскудукской подсвитой и верхними слоями белеутинской свиты (см. рисунок 2.4). С точки зрения тектонической обстановки, на формирование рудных узлов значительное влияние оказали крупные разломные зоны [17].

Литологические комплексы, формирующие рудоносные свиты, сохранили первичную структуру и не испытали регионального метаморфизма. В то же время, на глубинах, связанных с рудными телами,

обнаруживаются признаки постседиментационных гидротермальных процессов, затронувших как материнские породы, так и их минералогический состав.

Весь разрез продуктивных горизонтов — от таскудукской до жезказганской свиты — охватывается крупной сероцветной линзой, с которой непосредственно связано формирование рудных залежей Жомартского месторождения.

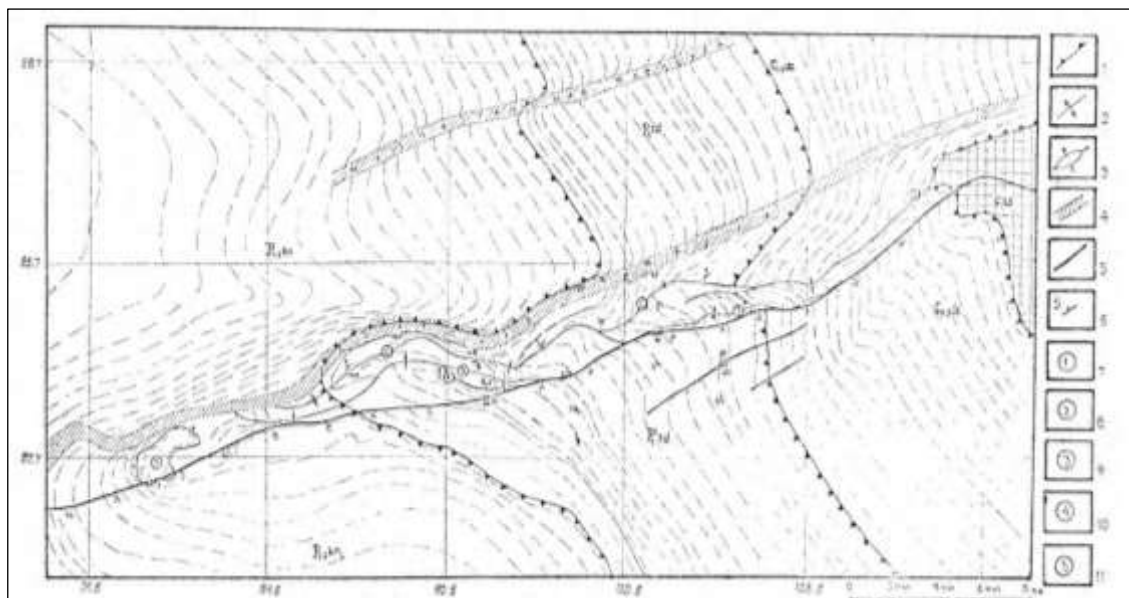


Рисунок 2.3 – Структурно-тектоническая схема месторождения Жомарт: 1 – граница между свитами; 2 – оси антиклинальных складок; 3 – брахиоантиклиналь; 4 – флексурные зоны; 5 – разрывные нарушения; 6 – элементы залегания пород; 7 – Таскуринская брахиоантиклиналь; 8 – Жаман-Айбатская антиклиналь; 9 – Западная антиклиналь; 10 – приразломная антиклиналь; приразломная синклиналь (АО «Жезказгангеология»)

Промышленное оруденение в пределах месторождения Жомарт преимущественно приурочено к разрезам, содержащим сероцветные отложения мощностью от 80 до 160 метров. При этом важным литологическим критерием рудоносности является содержание серых песчаников, доля которых в составе сероцветных пород должна превышать 50 %. Такие геологические условия формируют оптимальную среду для накопления и локализации полезных ископаемых.

Минеральная составляющая оруденения представлена, главным образом, медной, свинцово-цинковой и комплексной минерализацией, которая обладает чётко выраженным литологическим контролем. Она локализуется преимущественно в слоях серых песчаников, гравелитов и конгломератов. В отдельных случаях минерализация отмечается также в тонкозернистых песчаниках и алевропесчаниках, однако последние характеризуются низким содержанием рудных компонентов.

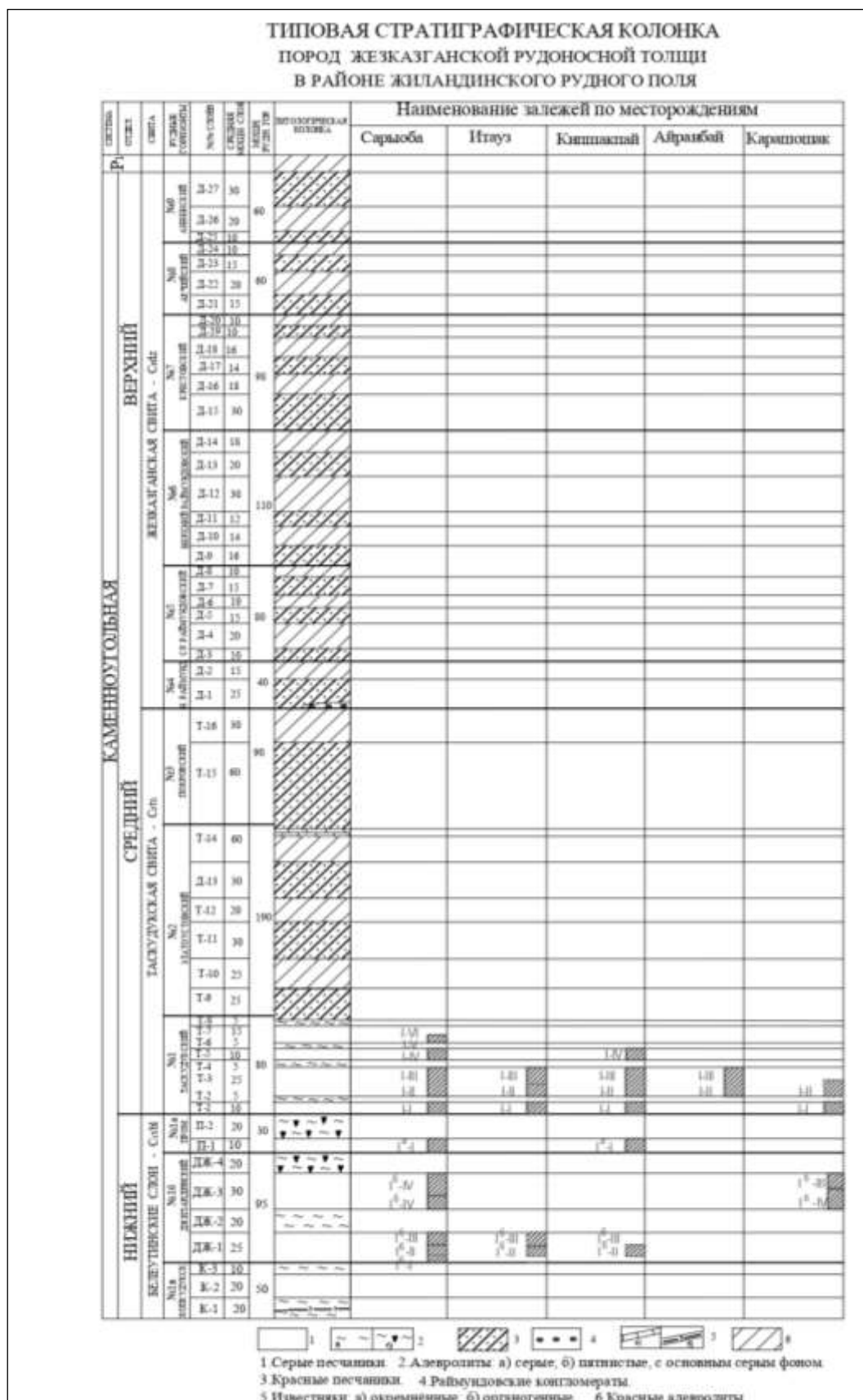


Рисунок 2.4 – Типовая стратиграфическая колонка рудных районов (АО «Жезказгангеология»)

Таким образом, промышленное оруденение концентрируется преимущественно в грубозернистых породах, тогда как тонкозернистые разности служат вмещающими, но слабо минерализованными породами.

Аналогично Жезказганскому рудному полю, в пределах месторождения Жомарт в разрезе продуктивных отложений чётко прослеживаются десять рудоносных горизонтов: три из них выделены в таскудукской свите и семь — в жезказганской.

Каждый из этих горизонтов, в свою очередь, подразделяется на ритмичные пачки, соответствующие циклотемам осадконакопления. Типичная структура такой пачки включает два слоя: нижний сероцветный песчаниковый, нередко содержащий в основании гравелиты или конгломераты, и верхний алевролитовый, который может включать прослои аргиллита. По мере изменения условий осадконакопления по простираанию и падению горизонтов сероцветные породы часто замещаются красноцветными.

В целом, на месторождении в пределах указанных десяти рудоносных горизонтов таскудукской и жезказганской свит выделено 28 пачек, каждая из которых рассматривается как потенциальная залежь. Эти ритмично построенные тела служат основой для прогноза и оценки ресурсов месторождения, а также планирования его промышленного освоения [16].

Рудные залежи в медистых песчаниках имеют форму протяжённых пластов, залегающих среди серых песчаников и конгломератов. Карбонатный цемент, ранее скреплявший породы, в результате минерализации был замещён соединениями меди — преимущественно сульфидами. Минерализованные участки занимают значительные площади и находятся на удалении от интрузивных тел. Гидротермальные изменения, воздействовавшие на вмещающие породы, как правило, выражены слабо и имеют ограниченное распространение [17].

2.3. Петрофизическая характеристика геологических комплексов рудника Жомарт

На площади исследований и прилегающей территории в предыдущие годы пробурены ряд глубоких скважин, по керну которых определялись физические параметры горных пород (Смирнова Н.Н., 1996). В скважинах Ю-29 и Ю-24 вскрыты отложения визе-серпуховских отложений, а в скважине Ю-2 достигли отложения жиделисайской свиты. Используются данные по керну структурно-поисковой скважины СП-14 глубиной 726,5 км, которая была остановлена в отложениях серпуховского яруса. Дополнительно при анализе физических параметров использованы результаты замеров по образцам горных пород из естественных обнажений по территории исследований. По образцам отобранных из керна и обнажений определялись плотность и магнитная восприимчивость (рисунки 2.5-2.7).

Наиболее полно изучены физические свойства пород среднего-верхнего карбона и перми, т.к. большинство скважин глубиной 600-1500м вскрыли отложения серпуховского яруса.

Физические свойства горных пород изучены с высокой степенью детализации. Важнейшим параметром, определяющим структурно-вещественные особенности массива, является *плотность горных пород*.

Ранее образовавшиеся породы протерозоя и нижнего палеозоя характеризуются значительно более высокими значениями плотности — от 2,60 до 3,00 г/см³. В то же время, породы девонского, карбонового и пермского возраста демонстрируют более стабильные значения плотности, без существенных аномалий. В пределах жезказганской серии выявлены как минимум две плотностные границы: между алевролита-аргиллитовыми отложениями жиделисайской свиты и песчанистой толщей той же свиты, а также между мергелями кингирской свиты и алевролита-аргиллитами жиделисайской.

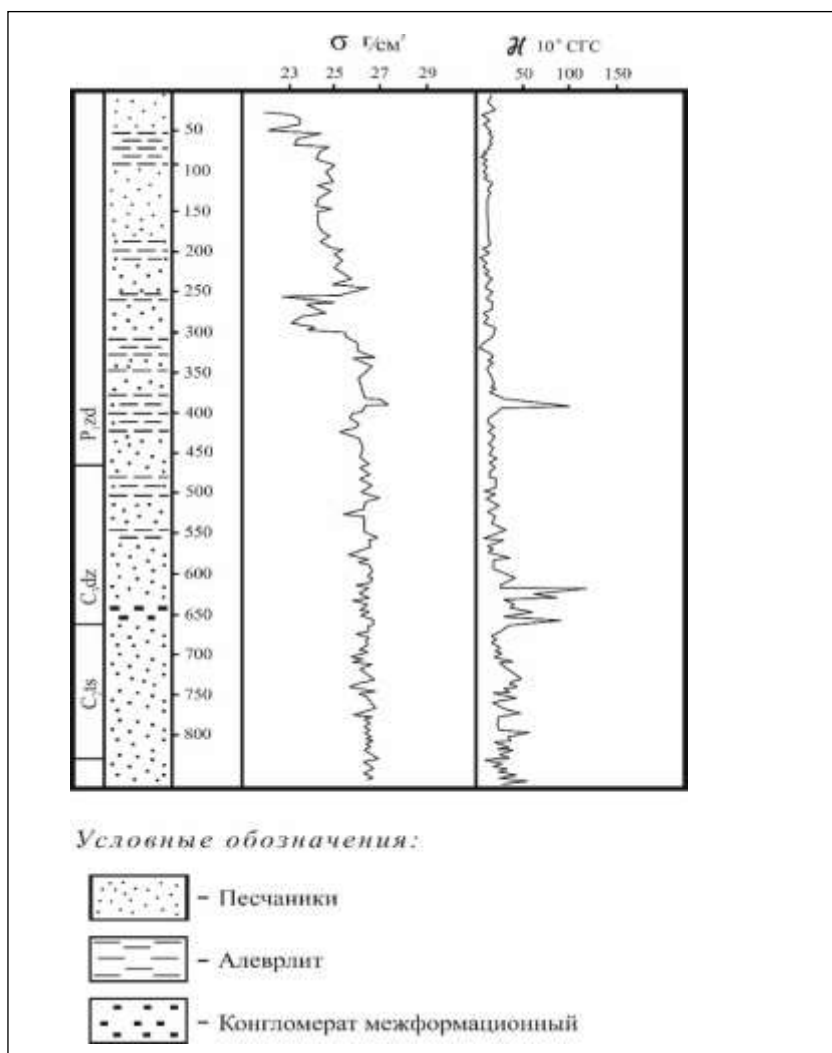


Рисунок 2.5 – Графики плотности и магнитной восприимчивости по скважине Ю-49 (АО «Жезказгангеология»)

По скважине Ю-42, например, на глубине 1100 м зарегистрирован скачок плотности с 2,64 до 2,68 г/см³, соответствующий границе между стратиграфическими горизонтами C1v3-s и C2ts. Однако следует отметить, что подобные границы не всегда имеют чёткое выражение и могут варьироваться в зависимости от литологического состава и степени цементации пород.

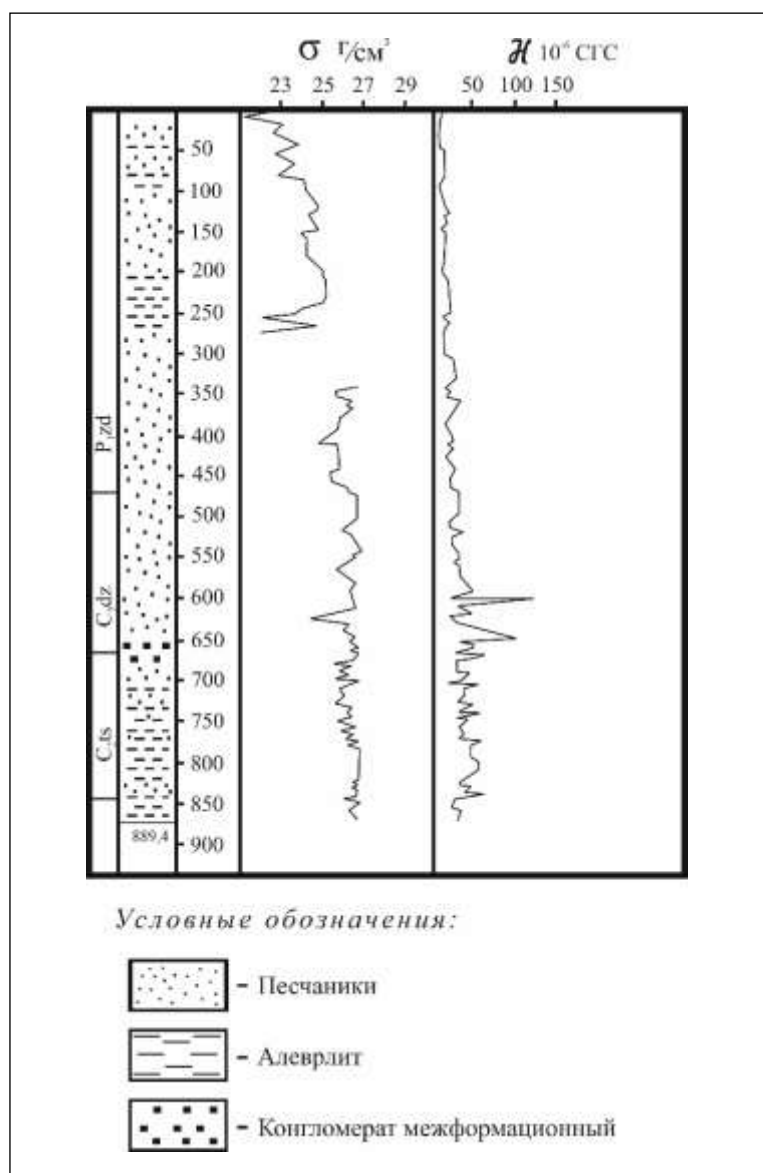


Рисунок 2.6 – Графики плотности и магнитной восприимчивости по скважине Ю-54 (АО «Жезказгангеология»)

Согласно данным определения физических параметров из керна пробуренных скважин наблюдается тенденция к увеличению плотности пород с глубиной для одних и тех же стратиграфических горизонтов, что связано с процессами выветривания в верхней части разреза и интенсивным процессам диагенеза на глубине. Зоны крупных тектонических нарушений сложены резко неоднородными по своей плотностной характеристике

породами. Среднее значение плотности пород в таких зонах значительно ниже плотности аналогичных комплексов в ненарушенных областях. Заметной и закономерной дифференциации по плотности между горизонтами и свитами карбона не наблюдаются.

Наибольшие значения плотности имеют горизонты песчаников и алевролитов от 2,65 до 2,75 г/см³ белеутинской и таскудукской свит, меньше значения плотности от 2,48 до 2,55 г/см³ у алевролитов и песчаников златоустского горизонта. Зеленые и серо-зеленые песчаники серпуховского возраста имеют плотность от 2,65 до 2,67 г/см³.

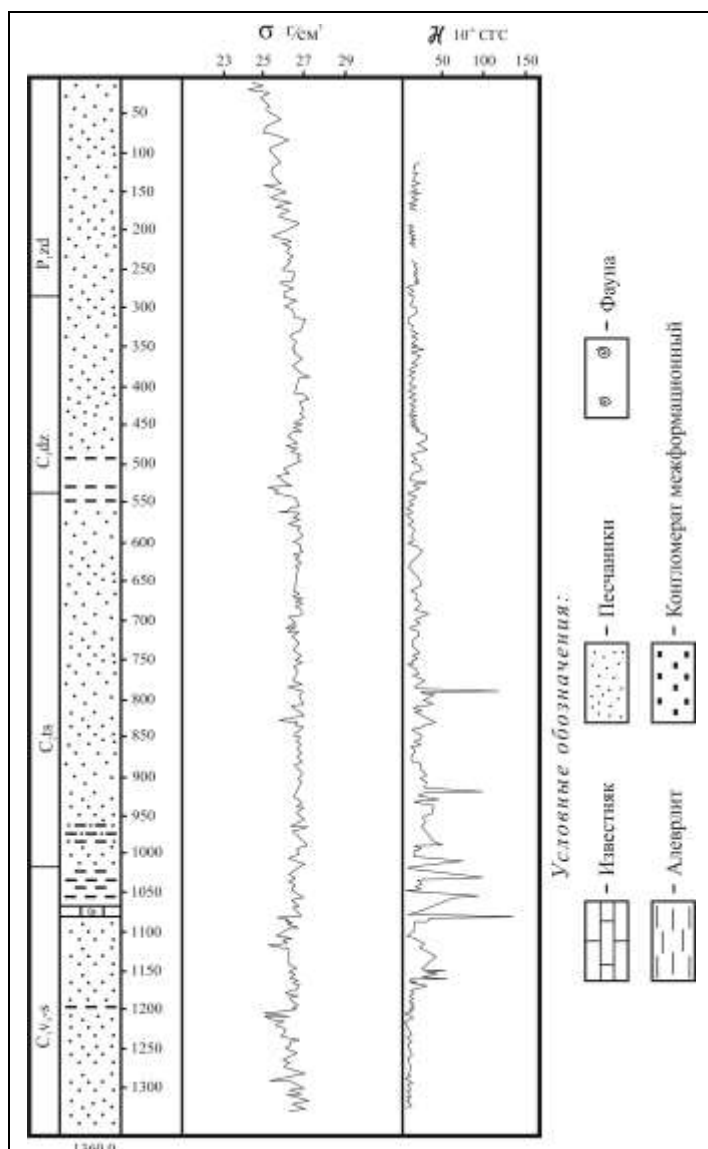


Рисунок 2.7 – Графики плотности и магнитной восприимчивости по скважине Ю-42 (АО «Жезказгангеология»)

Породы жезказганской свиты характеризуются значениями плотности 2,69 г/см³, изученные на большом количестве образцов керна. Физические параметры жезказганской и низов жиделисайской свит, как правило не

различаются. Средняя плотность отложений соленосной части разреза жиделисайской свиты составляет $2,3 \text{ г/см}^3$, дифференциация по отношению жезказганской и таскудукской свит составляет от $0,2$ до $0,4 \text{ г/см}^3$. Породы кенгирской свиты характеризуются разбросом значения плотности. В западной и центральной части Жезказганской синклинали плотность их составляет от $2,57$ до $2,66 \text{ г/см}^3$, а к востоку уменьшается до $2,28 \text{ г/см}^3$, что объясняется уменьшением мощности плотный мергелей и их интенсивной тектонической проработкой. Низы кенгирской свиты имеют пониженную плотность.

Плотность осадков мезокайнозоя незначительно распространенных на участке исследований изменяются в пределах от $1,9$ до $2,2 \text{ г/см}^3$.

Исследования, проведенные Жаман-Айбатской геологоразведочной партией в разные годы при участии сотрудников КазИМСа, выявили закономерности изменения плотности пород с запада на восток через Жаман-Айбатскую антиклиналь, в районе рудника Жомарт. В скважин Ю-3 и Ю-32 зафиксированы повышенные значения плотности, тогда как в районах скважин Ю-33 и интервала Ю-4 – Ю-28 — пониженные.

Основная рудная зона демонстрирует промежуточные значения плотности в диапазоне от $2,33$ до $2,70 \text{ г/см}^3$. При этом в разрезах безрудных скважин, таких как Ю-50 и Ю-44, значения плотности выше — от $2,44$ до $2,76 \text{ г/см}^3$. Это позволяет выделить потенциально рудоносные участки, которые располагаются в зонах с чередующимися блоками пониженной и повышенной плотности. Подобные участки находят отражение в гравитационном поле, что делает возможным их выявление методами геофизики.

Породы, формирующие продуктивные свиты Жезказганской и Таскудукской толщ, отличаются устойчивыми физико-механическими свойствами, что связано с их относительной литологической, структурной и фациальной однородностью. В тех зонах, где породы не подвергались воздействию выветривания, средние значения плотности составляют от $2,67$ до $2,71 \text{ г/см}^3$ и сохраняются почти неизменными как по площади, так и по глубинному разрезу. При этом плотность медистых руд, особенно в пределах горизонтов II–VII, повышается до $2,76$ – $2,87 \text{ г/см}^3$. На варьирование плотности рудных тел влияет множество факторов, среди которых — как условия формирования руд, так и изменения, происходящие в ходе оруденения: трансформация пористости, изменение текстуры и структуры пород, перераспределение компонентов в вмещающей среде и частичная перекристаллизация или замещение исходных минералов.

Весь осадочно-терригенный комплекс пород, охватывающий диапазон от рыхлого покрова до отложений среднего карбона и перми, по своим магнитным характеристикам относится к слабomagнитным образованиям. Значения магнитной восприимчивости в среднем находятся в пределах $0,6$ – $65 \cdot 10^{-5}$ единиц СИ. Незначительная вариация этого параметра объясняется разной концентрацией магнетита, присутствующего в составе пород.

Магнитное поле в первую очередь формируется за счёт литологических неоднородностей, характерных для пород фундамента. Магнитная восприимчивость пород, слагающих фундамент, в целом несколько повышена по сравнению с вышележащими породами. Магнитные аномалии создают эффузивы нижнего-среднего девона ($30-60 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ), зеленокаменные породы, амфиболиты (несколько тысяч 10^{-5} ед. СИ).

Геологический разрез участка рудника Жомарт, характеризуется высокоскоростным распространением упругих волн и слабой скоростной дифференциацией пород, что создает определенные сложности при проведении сейсморазведочных работ. На протяжении всего разреза наблюдается высокая степень однородности физических свойств, особенно в пределах средне- и нижнекарбоновых отложений, вскрытых в скважинах Ю-42 и Ю-54 (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Сводная таблица физических и механических свойств горных пород участка Жомарт

№	Горизонты	Ю-42		Ю-54	
		Скорость распространения упругих волн, м/с	Плотность, г/см ³	Скорость распространения упругих волн, м/с	Плотность, г/см ³
1	Породы джезказганской свиты (C3dz)	4500-4800		4200-4500	
2	Породы таскудукской свиты (C2ts)				
3	Верхний низе-серпуховский ярус (C1 v3-s)				
4	320-420 м (Ю-42) плотность пород джезказганской свиты в этом интервале	5000	От 2,65-2,67 до 2,70-2,73		
5	766 м (Ю-54) Появление в разрезе таскудукской свиты и серпуховского яруса плотных известняков, красных и серовато-красных песчаников и алевропесчаников с карбонатными включениями.			4750	

Анализ данных по пластовым скоростям в этих скважинах показывает минимальные изменения значений между разновозрастными породами, что подтверждает относительное однообразие геологического строения. При этом в скв. Ю-42 зафиксированы несколько более высокие скорости, что свидетельствует о наличии горизонтального градиента скоростей распространения упругих волн в пределах Жаман-Айбатской структуры. Данный вывод также подтверждается графическим анализом средних скоростей по разрезу, демонстрирующим однородность слоёв и направленный прирост скорости в горизонтальном направлении (рисунки 2.8-2.9).

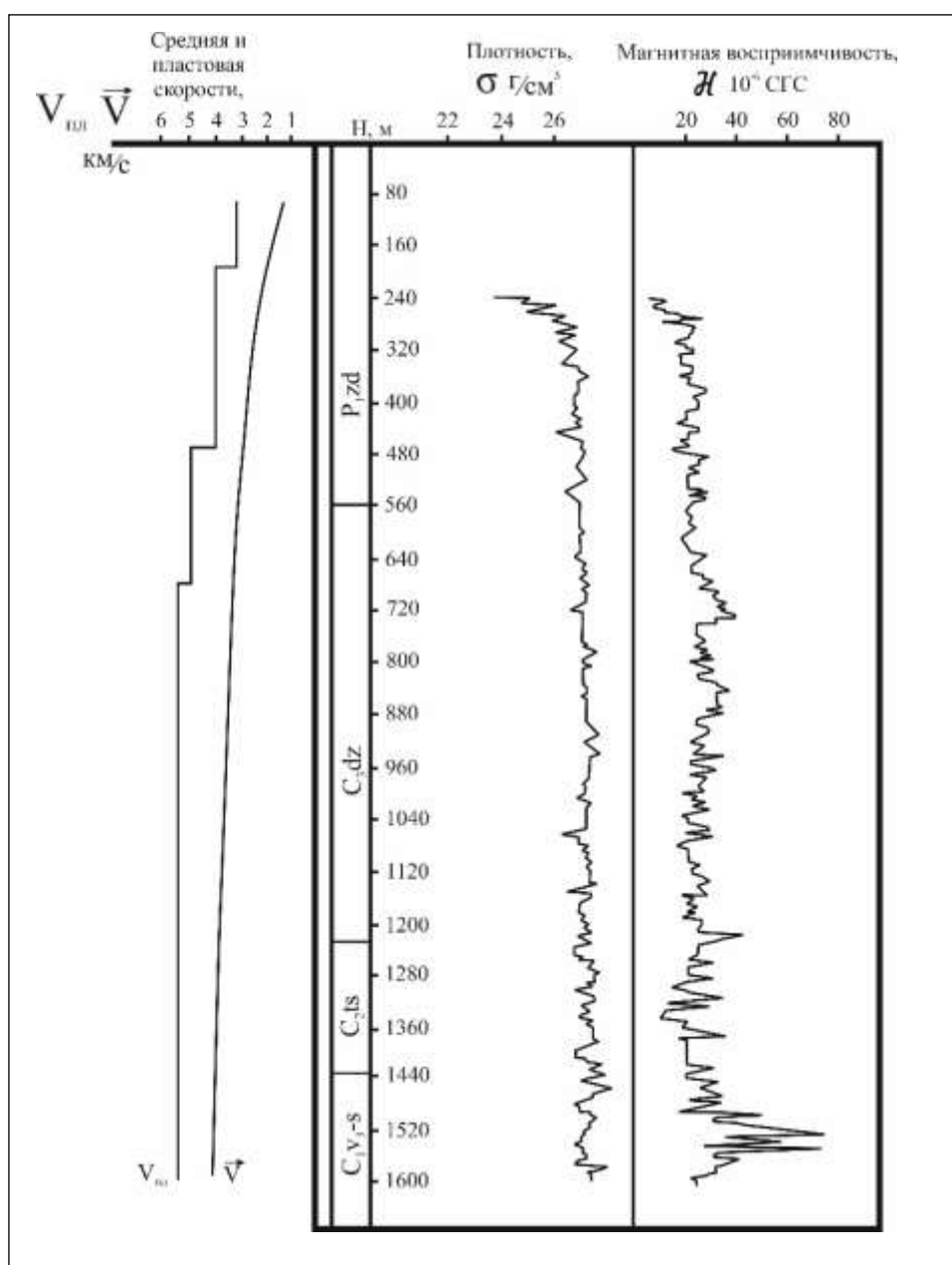


Рисунок 2.8 – Результаты обработки ПМ-ВСП и физические характеристики разреза по скважине 4062 (АО «Жезказгангеология»)

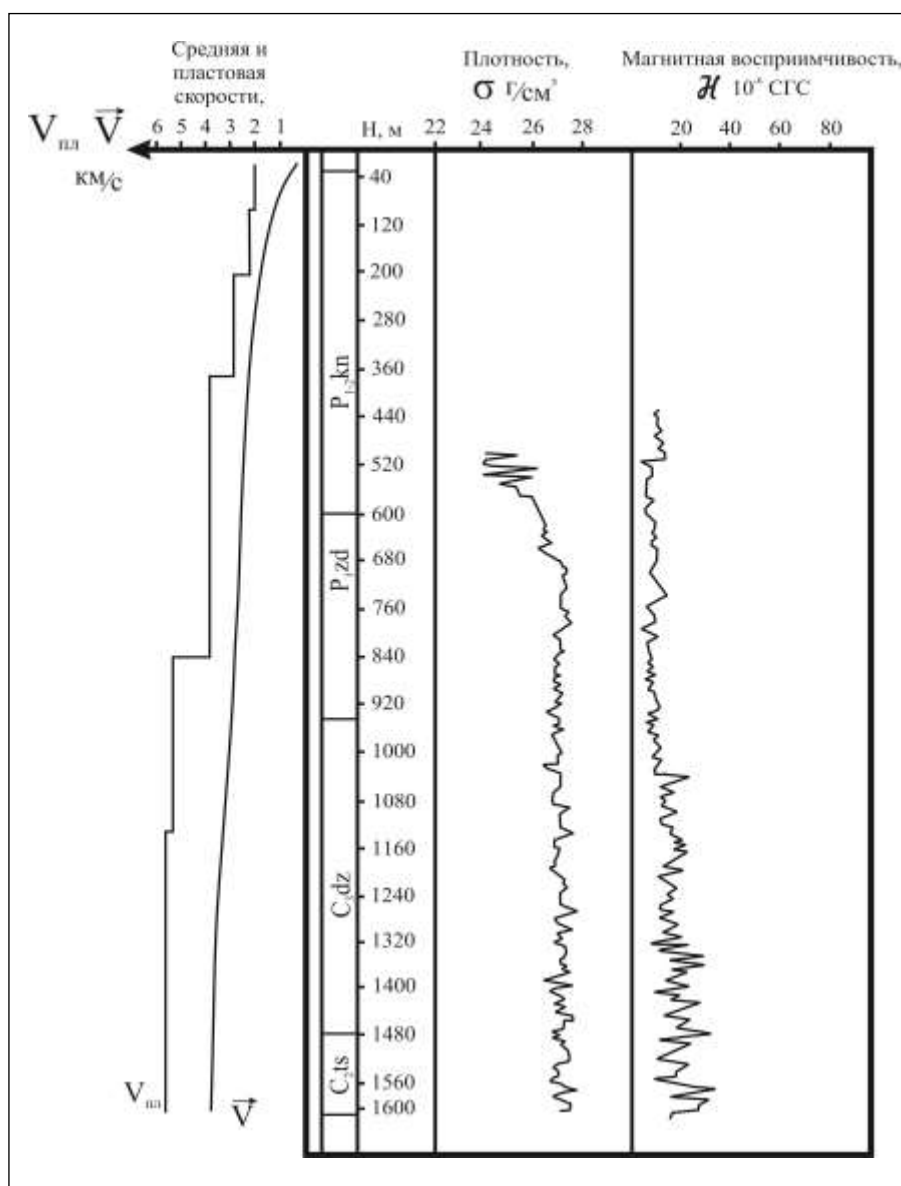


Рисунок 2.9 – Результаты обработки ПМ-ВСП и физические характеристики разреза по скважине 4063

По данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП), скорость продольных волн изменяется от 1250 до 5200 м/с. Наименьшие значения скорости зафиксированы в зоне трещиноватости и разрушения пород в пределах жиделисайской свиты, ближайшей к дневной поверхности. Скорости в диапазоне от 1250 до 2850 м/с отмечены в областях тектонического нарушения и повышенной пористости.

Основными факторами, влияющими на скорость распространения волн, являются разломы, зоны дробления, литологические и фациальные изменения, а также степень трещиноватости. Сопоставление скоростных и плотностных характеристик указывает на закономерный рост обоих параметров с увеличением геологического возраста пород. На возрастных границах между свитами — жиделисайской, жезказганской и таскудукской

— фиксируются скачки акустической жесткости, которые соответствуют формированию опорных отражающих горизонтов. Эти особенности имеют важное значение при построении геофизических моделей и прогнозировании геологического строения (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Физические свойства (пластовая скорость, плотность) горных пород рудника Жомарт

№	Возраст	Литологический состав	Пластовые скорости, V,м/с	Плотность, σ , г/см ³
1	Q	Пески поверхностные	-	-
2	Uz-Kz	Сухие пески, суглинки	400-1500	1,8/ 1,60-2,60
3	Mz	Кора выветривания палеозойских пород	1800	1,80/1,60-2,60
4	K2	Пестроцветные и серые глины	1600-2200	-
5	P ₁₋₂ kn	Темные мергели, известняки, песчаники	5000-5500	-
6	P ₁₋₂ kn	Светлые мергели, песчаники, аргиллиты	3000-3800	2,20
7	P _{1zd}	Красные и серовато-красные песчаники с гипсовыми включениями, алевролиты	3000-3800	2,20
8	P _{1zd}	Аргиллиты, красные и серовато-красные песчаники с карбонатными включениями	4400	2,47
9	P _{1zd} -C _{3dz}	Песчаники		2,52
10	C _{3dz}	Красные и серовато-красные песчаники	4200-4800(до 5000)	До 2,65-2,73
11	C _{2ts}	Красные и серовато-красные песчаники	4200-4800	2,63
12	C _{1v3} -s	Красные и серовато-красные песчаники	4200-4800	-

Электрофизические свойства горных пород являются важным фактором при комплексной оценке их петрофизических параметров. Данные по удельному электрическому сопротивлению и поляризуемости были представлены в исследованиях [18, 19], проведенных на территории северного участка Жезказганской синклинали. Эти работы были направлены на детальное изучение геофизических и петрофизических характеристик стратиформных залежей меди и полиметаллов. Полученные результаты использовались для оптимизации методических подходов к поиску и оценке перспективных рудных объектов, в том числе в рамках поисково-оценочных мероприятий по меди (таблица 2.3)

Таблица 2.3 – Физические свойства горных пород и руд Жезказганского рудного района

№ п/п	Наименование горных пород	Возраст	Кол-во опред.	Удельное эл. сопротивл.(ρ _к) в Ом·м			Поляризуемость (η _к) в %		Скорость прод. волн, км/сек
				мин.	макс	сред	мин	макс	
1	Пески, песчаники, суглинки, конгломераты	Mz-Kz	100	2	100	30	0,2	1,2	0,5-1,5
2	Мергели, мергелистые известняки, песчаники, алевролиты, аргиллиты	P ₁ kn	300	50	200	100	0,5	2,0	3,5-4,5
3	Малиново-красные аргиллиты, алевролиты, песчаники	P ₁ qd	270	5	50	30	0,2	1,0	1,8-3,6
4	Красноцветные мелкозернистые песчаники, алевролиты, аргиллиты	C ₂₋₃	226	150	400	200	0,5	1,0	4,1-4,6
5	Среднезернистые бурые и серые песчаники, алевролиты конгломераты, известняки	C ₂₋₃	165	300	800	300	0,5	2,2	-
6	Зелено-серые песчаники, известняки, аргиллиты	C ₁	286	50	200	120	0,6	2,2	-
7	Красные аркозовые песчаники	D ₂₋₃	236	200	500	300	0,6	2,2	5.0-5.5
8	Конгломерато-порфировая толща	D ₁	212	200	3000	300	0,6	2,2	-
9	Сланцы, порфиритоиды, эффузивно-осадочные породы	Pz ₁	280	700	5000	До 1000	0,5	2,0	До 6,0
10	Метаморфические сланцы, гнейсы, мраморы	R	350	500	6000	До 1000	0,9	2,0	6,0-6,5
11	Гранитоиды	D ₁	284	500	8000	1000	0,5	1,3	6,0
12	Габброиды		272	500	8000	1000	0,5	1,3	6,0
13	Медные руды	C ₂₋₃	20	0,1	50	20	4,0	23	-
14	Богатые медные руды	C ₂₋₃	30	0,05	0,1	0,07	14	27	-

По данным каротажа и электроразведки методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ), наиболее низкими значениями кажущегося сопротивления характеризуются алевролиты и тонкозернистые песчаники жиделисайской свиты от 57 до 72 Ом·м. В породах жезказганской свиты диапазон сопротивлений значительно шире — от 4 до 250 Ом·м, что объясняется различным содержанием глинистого материала. В рудоносных конгломератах, гравелитах и серых песчаниках сопротивление составляет от 45 до 68 Ом·м.

В то время как в безрудных породах от 60 до 160 Ом·м. В отложениях таскудукской свиты также наблюдается пониженное сопротивление, в среднем от 54 до 92 Ом·м, особенно в алевролитах. Подобное распределение КС подтверждено многолетними измерениями методом ЗСБ, при этом наиболее электропроводными породами признаны водоносные образования жиделисайской свиты. С увеличением глубины сопротивление возрастает, достигая локальных максимумов в интервале 500–800 м, что связано с наличием сероцветных пород в продуктивных горизонтах.

Анализ представленных данных свидетельствует о поступательном росте удельного электрического сопротивления по мере углубления разреза: от нескольких Ом·м в глинах мезокайнозойского возраста до сотен и даже тысяч Ом·м в породах каледонского фундамента.

К числу низкоомных пород относятся песчано-глинистые отложения мезокайнозойского возраста, а также алевролитопесчанистые слои нижнепермской жиделисайской свиты, для которых характерны средние значения удельного электрического сопротивления порядка 50 Ом·м. Более высокие показатели сопротивления наблюдаются в пределах нижнекаменноугольной карбонатно-терригенной толщи, а также среди мергелистых и терригенных пород нижней перми кингирской свиты, где значения достигают от 100 до 125 Ом·м.

Породы, сформировавшиеся в пределах среднего и верхнего карбона, такие как разноцветные мелко- и среднезернистые песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты и известняки, а также терригенные отложения девонского возраста (среднего и верхнего) и нижнедевонские конгломератопорфировые образования, характеризуются средними значениями удельного электрического сопротивления, находящимися в интервале от 200 до 300 Ом·м.

Породы рифейского и палеозойского возраста отличаются повышенными значениями удельного электрического сопротивления, в отдельных случаях достигающими 1000 Ом·м. Однако в пределах тектонически нарушенных зон их сопротивление может существенно снижаться — до уровней, сопоставимых с сопротивлением рыхлых отложений или зон выветривания. Интрузивные тела также демонстрируют высокие значения сопротивления, варьирующиеся в широком диапазоне от 500 до 8000 Ом·м.

Согласно результатам исследований, проведённых В.Н. Хайловским (1984), при наличии перекрытия палеозойского фундамента проводящими рыхлыми отложениями, а также в условиях повсеместного развития зоны выветривания, использование методов электроразведки на основе сопротивления неэффективно для прямого выявления рудных объектов [20].

В таблице 2.4 представлены значения удельного электрического сопротивления для различных геоэлектрических горизонтов, определённые в результате интерпретации данных параметрических ДЭЗ, БКЗ и ВЭЗ.

Таблица 2.4 – Сводная таблица удельных электрических сопротивлений отдельных геоэлектрических горизонтов

Геологический индекс	Литологический состав	УЭС	Наиболее часто встречающееся сопротивление
Q	Пески и суглинки	50-1000	100-800
Р-N	Глины	2-20	7-10
Р	«Сливные» песчаники	100-800	–
К	Пески, галечники	100-300	–
К	Гравий, галечники	10-12	–
К	Глины	25-30	–
Р ₁₋₂ kn	Мергели, переслаивание мергелей с песч. алевролитами	90-350	–
Р ₁₋₂ kn	Мергели	100-300	100
Р ₁₋₂ kn	Плотные мергели, мергелистые глины	20-50	–

Таким образом, петрофизическая характеристика геологических комплексов рудника Жомарт выявляет высокую степень однородности разреза, закономерное распределение плотности и скорости упругих волн, а также локальные аномалии, связанные с литологическими различиями и обводнённостью пород.

Полученные данные служат основой для выделения потенциальных рудоносных зон, оценки фильтрационных свойств массива и построения прогностических моделей при дальнейшей подземной разработке.

3 Общее состояние напряженно-деформированного состояния массива горных пород рудника Жомарт

3.1 Горно-геологические условия разработки месторождения Жомарт

Горно-геологические условия разработки месторождения Жомарт формируются под воздействием целого комплекса природных факторов, среди которых важнейшими являются форма, залегание и состав рудных тел, литологические и физико-механические свойства вмещающих пород, а также структура верхних горизонтов, участвующих в формировании кровли горных выработок. Месторождение Жомарт входит в состав Жезказганского рудного района и во многом повторяет геолого-промышленную модель Жезказганского месторождения. Как и в Жезказгане, основная медная минерализация связана со стратифицированными сульфидными залежами, приуроченными к жезказганской красноцветной терригенной толще [21].

Рудные тела на Жомарте залегают преимущественно полого, что существенно облегчает условия подземной разработки. Основная зона оруденения располагается в пределах так называемого раймундовского горизонта, который прослеживается по простиранию на 14 километров. В пределах этого участка залежи постепенно погружаются с глубины 380 метров на востоке до 680 метров на западе, демонстрируя плавное западное падение. Морфология главного рудного тела изменяется от лентообразной на востоке до плащеобразной на западе. Протяжённость залежи достигает 8600 метров при ширине, колеблющейся от 200 до 4000 метров. Глубина залегания подошвы варьирует в пределах от 430 до 669 метров. Такое строение формирует благоприятную геометрию для подземной отработки с применением камерных и этажных систем (рисунок 3.1).

Минеральный состав руд представлен преимущественно медными сульфидами, среди которых доминирует халькозин, достигающий 53,1% от общего объёма. Второстепенное значение имеют борнит (31,1%) и халькопирит (14,5%). Самородная медь встречается крайне ограниченно. Месторождение богато также такими компонентами, как серебро и рений, что делает его стратегически важным объектом. Кроме того, в рудах обнаруживаются свинец, цинк и мышьяк, что позволяет классифицировать их как комплексные. В зависимости от соотношения основных компонентов, на месторождении выделяются различные типы руд: медные, медно-свинцовые, медно-цинковые, медно-серебряные, свинцово-цинковые и серебряносодержащие. Основная часть запасов представлена медными рудами (94,5%), а доля комплексных руд составляет около 5,5%. Комплексные руды в значительной степени сосредоточены на Западном участке, где их доля достигает 91,4%, тогда как на Центральном участке они почти не встречаются [17, 22].

Геологическое строение месторождения представлено чередующимися слоями терригенных пород жезказганской свиты: средне- и крупнозернистыми песчаниками, гравелитами, конгломератами, а также тонкозернистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Многоярусное оруденение приурочено к проницаемым слоям вмещающих пород, среди которых песчаники и алевролиты играют ведущую роль в формировании рудных тел. Породы обладают различными физико-механическими характеристиками, что сказывается на устойчивости горных выработок. Наджезказганская свита представлена красноцветными глинистыми породами жиландинской свиты, играющей роль покрова (рисунок 3.2).

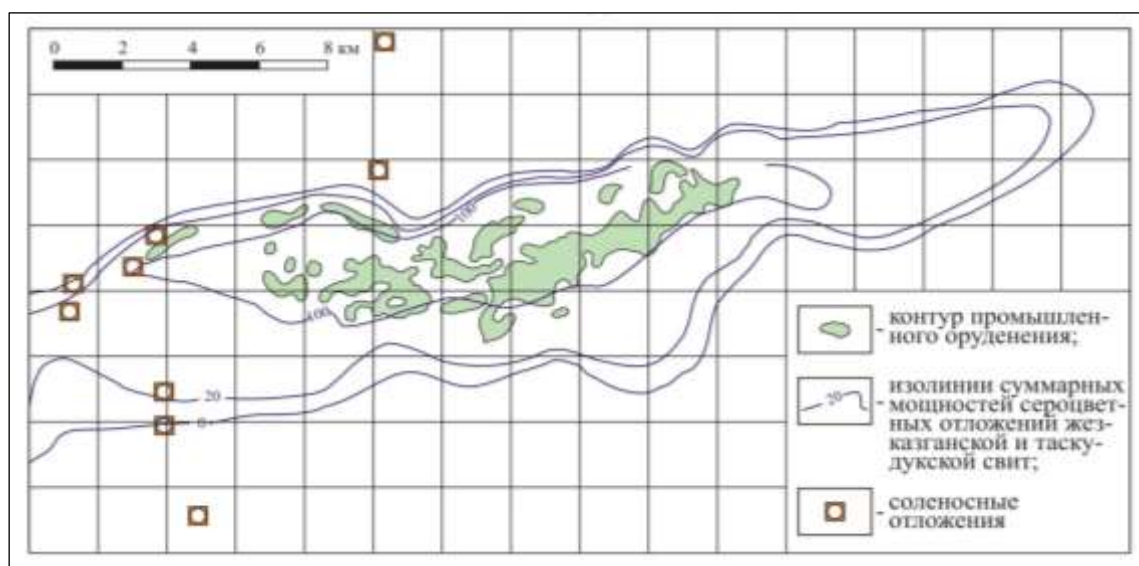


Рисунок 3.1 – Строение рудовмещающей сероцветной линзы Рудника Жомарт (АО «Жезказгангеология»)

Минеральный состав вмещающих пород включает полевой шпат, кварц (с различной степенью кристаллизации), а также эффузивные и туфогенные породы, алевролиты, сланцы и кремнистые образования. Кремни, как частично, так и полностью окремнённые известняки, обнаруживаются в рудоносных горизонтах, особенно в горизонте №2, и окрашены в диапазоне от светло-серого до почти чёрного. Алевролиты, как правило, красного цвета, состоят из глинистой массы, обогащённой гидроокислами железа, с включениями слабоокатанных фрагментов кварца и полевых шпатов. Аргиллиты представлены преимущественно красноцветными породами, но в пределах таскудукского горизонта могут быть зеленовато-серыми, с высоким содержанием цементирующих веществ (до 25%) и примесью органических соединений, что придаёт породам более тёмный цвет.

Структура кровли очистных камер оказывает значительное влияние на устойчивость подземных горных выработок. Кровля сложена слоистыми серыми мелкозернистыми песчаниками, которые чередуются с темно-серыми алевролитами, аргиллитами и конгломератами. Эти породы залегают с углом

падения не более 8 градусов. Мощность отдельных слоёв варьирует от 0,2 до 1,0 метра. Такое строение требует детального расчёта при выборе крепей и методов поддержания устойчивости кровли, особенно при разработке пластов со сложной текстурой [23].

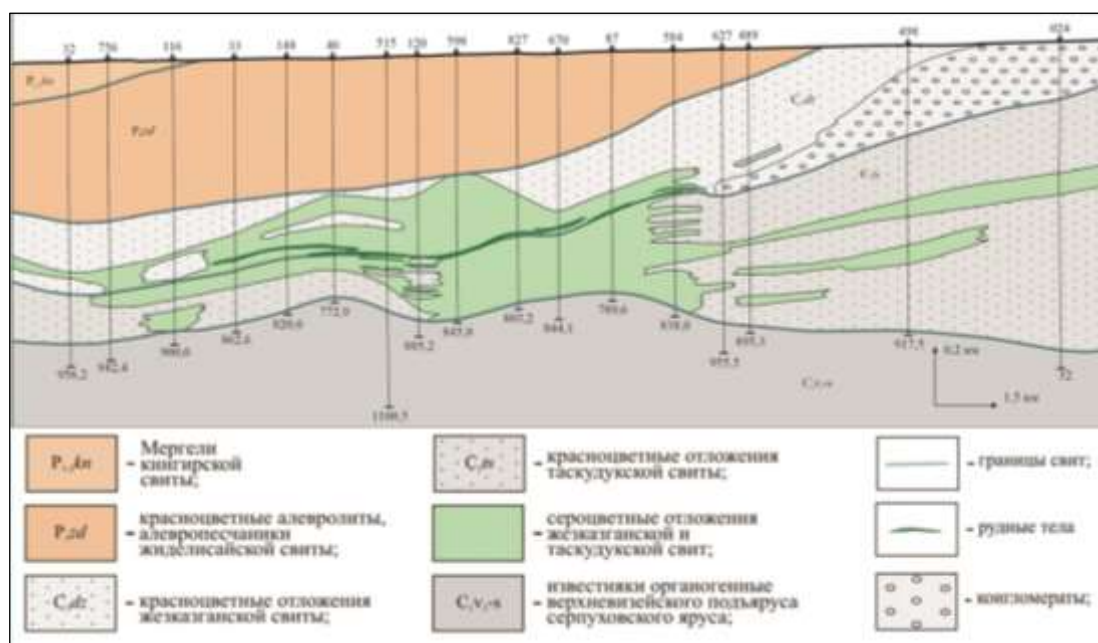


Рисунок 3.2 – Продольный схематический геологический разрез рудника Жомарт (АО «Жезказгангеология»)

Физико-механические свойства вмещающих пород варьируют в широких пределах. Серые песчаники обладают высокой прочностью: предел прочности на одноосное сжатие составляет от 48 до 281 МПа, а на растяжение — от 2,3 до 12,8 МПа. Бурые мелкозернистые песчаники менее прочные, с показателями сжатия от 27 до 163 МПа и растяжения от 1,3 до 11,6 МПа. Раймундовские конгломераты демонстрируют хорошие прочностные качества: $\sigma_{сж}$ в пределах 84–141 МПа и σ_r от 6 до 10,1 МПа. Наименьшие прочностные характеристики присущи алевролитам и аргиллитам, у которых $\sigma_{сж}$ составляет от 10 до 88 МПа, а σ_r — от 0,5 до 7,5 МПа. В среднем, коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова колеблется от 6 до 13, что свидетельствует о преобладании пород средней и высокой крепости, требующих применения механизированных и комбинированных способов крепления в выработках [24].

Месторождение подразделяется на четыре основных участка — Центральный, Восточный, Западный и Северный. Каждому из них присущи свои литологические и структурные особенности, типы руд и распределение компонентов, что важно учитывать при проектировании систем разработки и планировании добычи. Все эти факторы в совокупности формируют горно-геологическую обстановку, которая оказывает ключевое влияние на выбор

методов отработки, безопасность производства и эффективность освоения минеральных ресурсов месторождения Жомарт.

3.2 Горно-технические условия разработки месторождения Жомарт

Разработка месторождения Жомарт, начатая в 2006 году, осуществляется с применением панельно-столбовой системы с поэтапной выемкой междукammerных целиков и последующим погашением образующихся пустот. Система предполагает двухстадийную отработку: на первом этапе добываются камерные запасы под защитой барьерных целиков, а на втором этапе осуществляется выемка целиков, освобождение и погашение выработанного пространства. Выбор такой схемы обоснован аналогичными условиями, выявленными на Жезказганском месторождении, которое по геологическому строению во многом напоминает Жомарт.

На первоначальном этапе разработки были применены параметры панельно-столбовой системы, аналогичные используемым на Жезказгане. В частности, на панелях 1, 2, 3 и 39 юг залежи 4-I были заданы расстояния между барьерными целиками в 150 метров, пролет панели в свету составлял 130 метров, ширина барьерного целика достигала 20 метров. Междукammerные целики (МКЦ) размещались по сетке 18×18 метров, их диаметр составлял 9 метров. Таким образом, по ширине панели предусматривалось 7 рядов МКЦ и 8 очистных камер [24].

Однако вскоре после начала работ в панелях 1, 2 и 3, когда были оформлены первые ряды МКЦ, начались интенсивные разрушения этих целиков. Геомеханический анализ показал, что принятые параметры, перенесённые с Жезказгана, не соответствуют реальным условиям Жомарта. В частности, прочность рудного массива на Жомарте оказалась почти в два раза ниже, а строение вмещающих пород оказалось значительно сложнее: наблюдалось более частое переслаивание, в том числе с участием слабых углистых прослоев, что существенно снижало несущую способность массива.

В результате была произведена корректировка системы разработки. Пролет панели в свету был снижен до 95 метров, шаг барьерных целиков остался прежним (150 метров), однако их ширина была увеличена до 55 метров. Количество очистных камер по ширине панели сократилось до 6, а МКЦ – до 5. Вместо столбчатых междукammerных целиков стали применяться ленточные, размерами 9×30 метров, размещаемые в шахматном порядке. С такими параметрами были отработаны панели 1, 2, 3, 39 север, 40 и 41 залежи 4-I. Геомеханическое состояние кровли и МКЦ в этих условиях оценивалось как удовлетворительное. Схематическое изображение параметров панельно-столбовой системы разработки в этот период представлено на рисунке 3.3.

Тем не менее, из-за высоких потерь руды в целиках (до 50%), позднее была проведена ещё одна корректировка системы. Новый проект

предусматривал снижение шага между барьерными целиками до 125 метров, уменьшение пролета панели в свету до 85 метров и сокращение ширины барьерных целиков до 40 метров. Количество камер по ширине панели сократилось до 5, а рядов МКЦ – до 4. Ленточные междукamerные целики были заменены на столбчатые по сетке 19×19 метров.

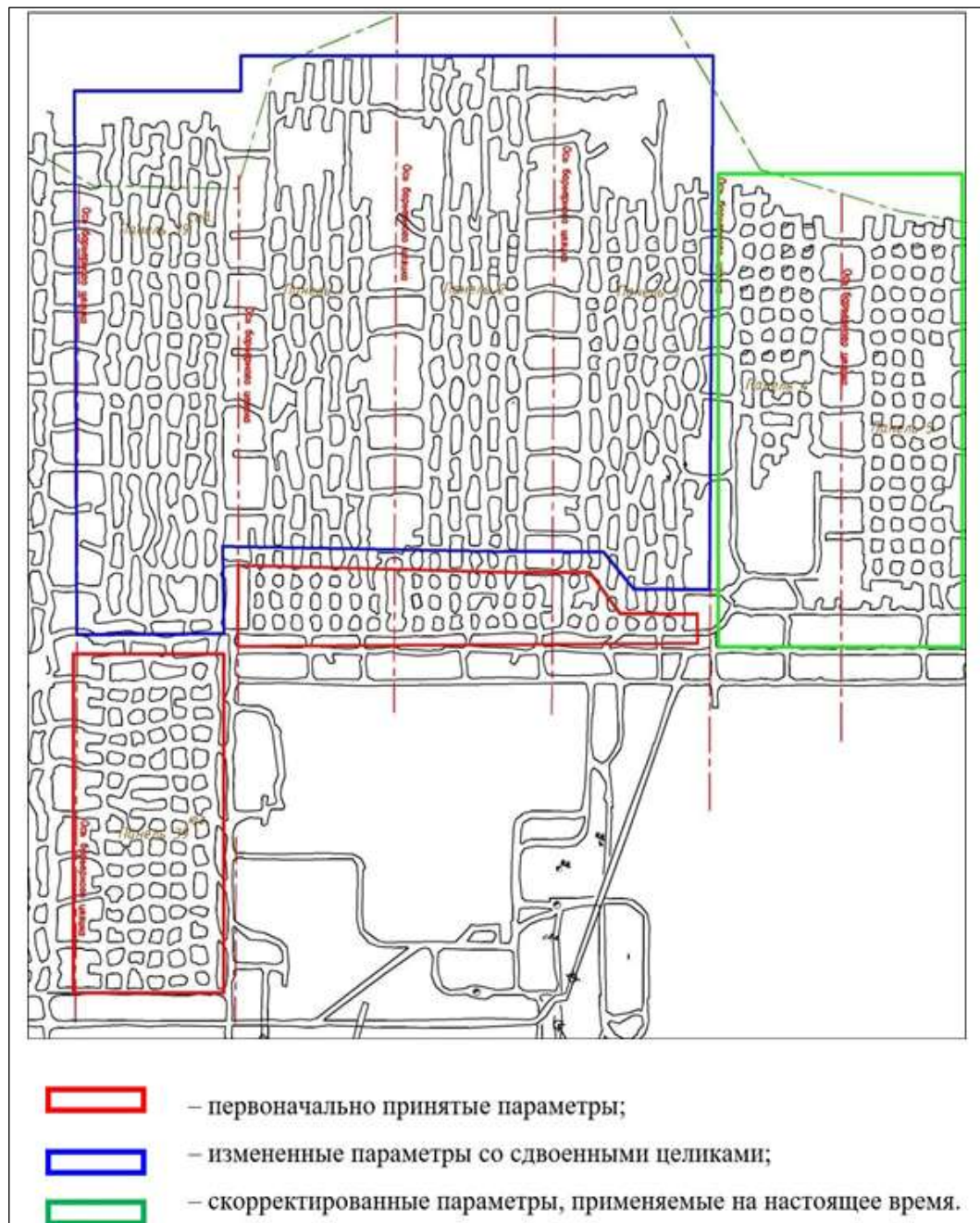


Рисунок 3.3 – Применяемые параметры камерно-столбовой системы на месторождении Жомарт [27]

Ширина столбчатых МКЦ составляла 10 метров, ширина камер — 9 метров. С такими параметрами успешно осуществляется отработка панелей 4, 5, 6, 42, 43, 44 и всех последующих на залежи 4-I. Состояние

междукамерных целиков при этом оценивается как удовлетворительное, хотя фиксируются признаки локальных деформаций. Подробные значения параметров системы разработки на различных этапах представлены в таблице 3.1 [25].

Важным элементом контроля за безопасностью ведения горных работ является мониторинг состояния конструктивных элементов панельно-столбовой системы — кровли камер и МКЦ. В среднем на месторождении ежегодно вскрывается от 200 до 230 тысяч квадратных метров кровли камер, при этом площадь отслоений составляет от 8,8 до 16 тысяч квадратных метров.

Таблица 3.1 – Статистика произошедших вывалов и отслоений пород с кровли за 2008–10 гг

<i>Отслоения, вывалы пород с кровли</i>		
<i>год</i>	<i>площадь, м²</i>	<i>количество, шт</i>
2008	8824	60
2009	14351	82
2010	16081	77
среднее значение	13085,3	73
общее	39256	219

Согласно статистике за 2008–2010 годы было зафиксировано 219 случаев отслоений пород с кровли. Анализ показал, что распределение площадей и мощностей вывалов подчиняется логнормальному закону, как это отражено на рисунке 3.4. Взаимосвязь между площадями и мощностями вывалов при этом отсутствует, что подтверждается на рисунке 3.5. Более половины вывалов (52%) приходятся на площади до 100 м², крупные вывалы (600–1200 м²) составляют лишь 1%. В 67% случаев мощность вывалов не превышает 2 метров, однако в 33% отслоения происходят на глубину, превышающую глубину анкеровки, что указывает на недостаточную надёжность крепи при проектной ширине камер в 9 метров. Это свидетельствует о необходимости снижения ширины очистных камер с целью повышения их устойчивости и снижения риска аварий [24, 26].

Повреждения второго важнейшего конструктивного элемента — междукамерных целиков — за весь период эксплуатации рудника проявились в виде частичных разрушений. Из примерно 5000 МКЦ, оформленных за 10 лет, 127 получили повреждения, в основном в виде потери несущего сечения от 10 до 30% после отслоений с боковых поверхностей. Это составляет около 2,5% от общего числа, при этом случаев полного разрушения зафиксировано не было. Основные формы разрушения целиков представлены в виде отслоений плит и блоков по субвертикальным трещинам, а также

выдавливания слабых прослоев — данные формы деформации наглядно продемонстрированы на рисунке 3.6.

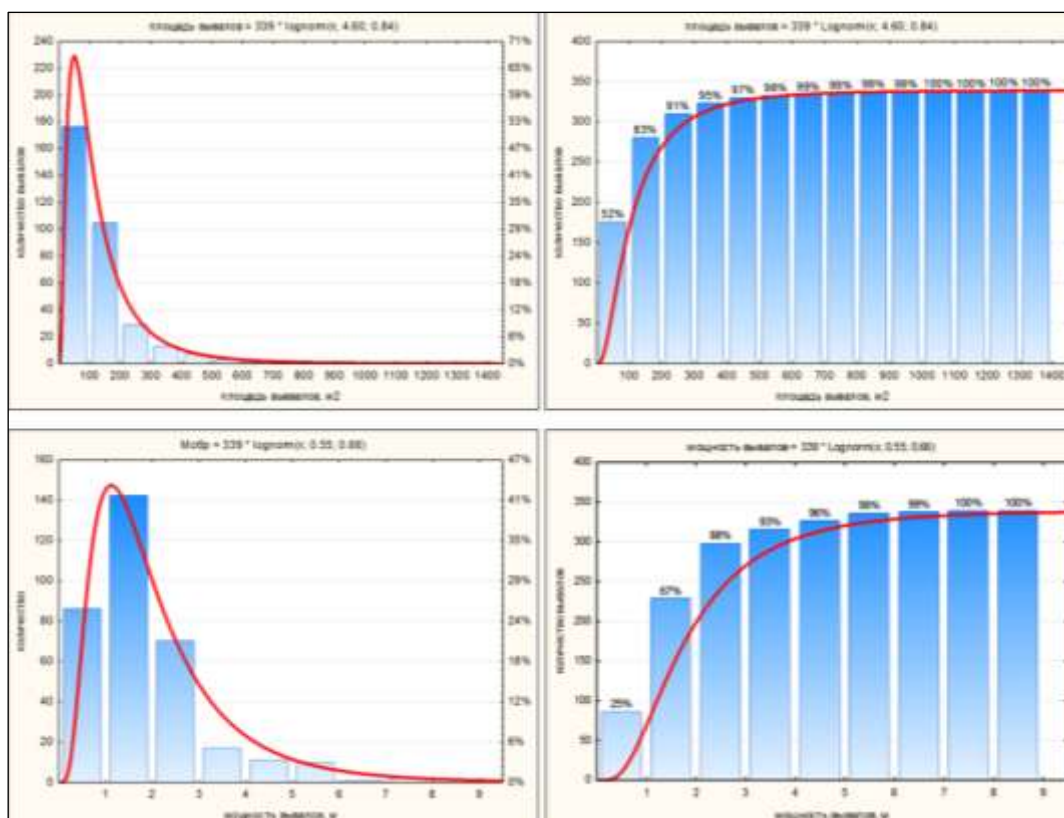


Рисунок 3.4 – Плотности (слева) и кумулятивные кривые(справа) распределения площади (вверху) и мощности (внизу) вывалов из кровли очистных камер на месторождении Жомарт [27]

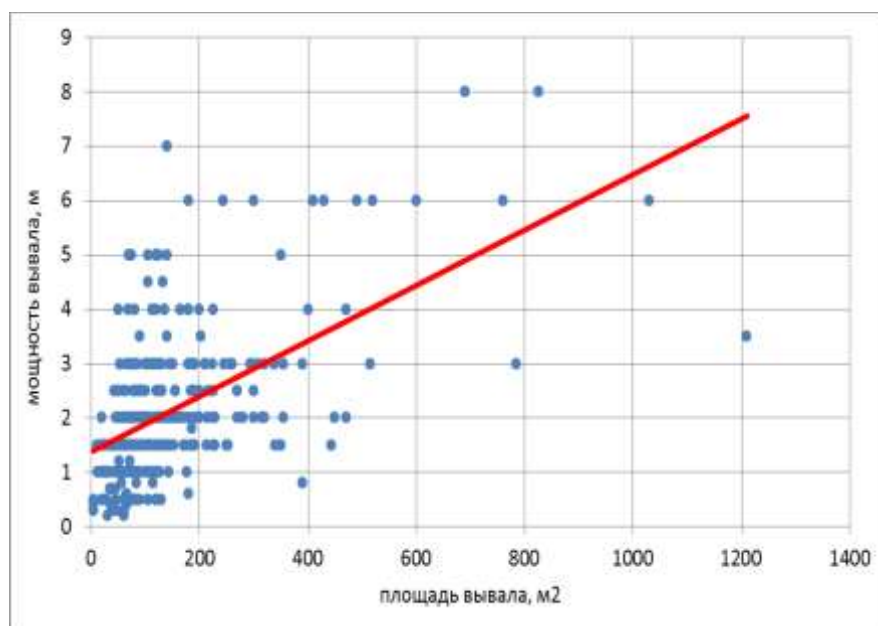


Рисунок 3.5 – Соотношения площадей и мощностей вывалов [27]

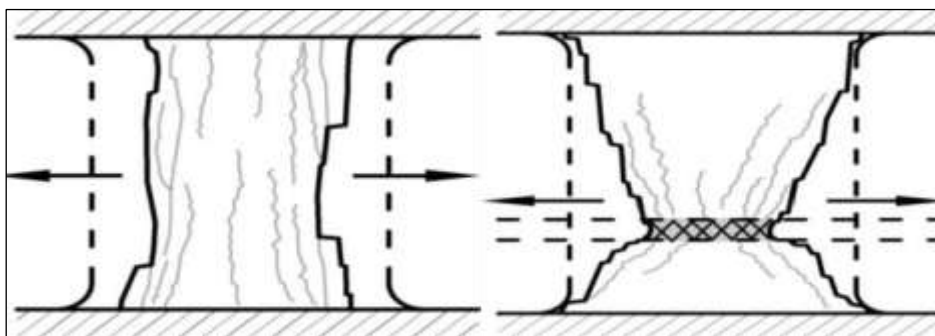


Рисунок 3.6 – Характерные формы разрушения МКЦ со слабыми контактами на месторождении Жомарт [27]

Отслоения боковых поверхностей целиков чаще фиксируются с западной и восточной сторон МКЦ из-за наличия крутонаклонных трещин, перпендикулярных простиранию залежи. В большинстве случаев их мощность не превышает 0,5 м. Основная часть отслоений происходит в первые месяцы после отработки панели, что указывает на чувствительность целиков к внешним нагрузкам. Это подтверждает рисунок 3.7.

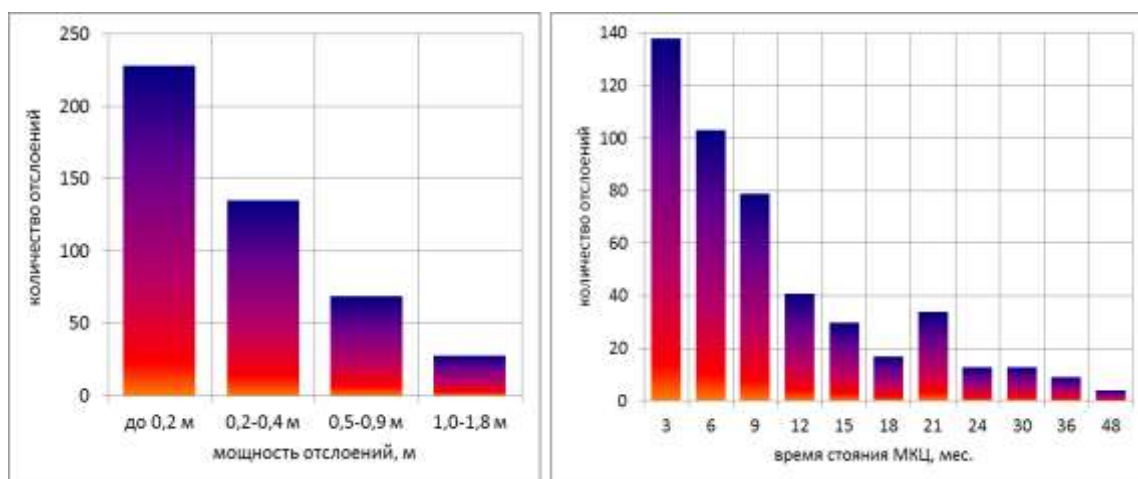


Рисунок 3.7 – Распределения отслоений с МКЦ по мощности и времени стояния [27]

Детальный анализ горно-технических условий разработки месторождения Жомарт позволяет утверждать, что используемая система требует постоянной адаптации под реальные геомеханические условия. Несмотря на улучшение параметров и снижение количества критических повреждений, остаётся необходимость в дальнейшем уточнении проектных решений, в частности, в части ширины камер, системы крепления и геомеханического обоснования прочности МКЦ [27].

4 Методика исследований

Настоящая глава посвящена изложению методических подходов, применённых при выполнении комплекса сейсморазведочных и геомеханических исследований, направленных на изучение напряженно-деформированного состояния горного массива в области подземных горных выработок. Основой для решения поставленных задач стал комплексный анализ результатов сейсморазведки и физико-механических параметров горных пород, что позволило получить достоверные сведения о строении массива и локализовать потенциально опасные зоны.

В работе использовались полевые сейсмические исследования, проведённые с применением метода общей глубинной точки (МОГТ) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Анализировались и вычислялись скоростные характеристики геологического разреза, полученные по данным этих методов. Особое внимание уделялось определению скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн, на основе которых выполнена оценка жёсткости природных массивов.

Дополнительно были обработаны данные по напряженно-деформированному состоянию массива вокруг выработок, полученные как экспериментальными измерениями, так и аналитическими расчётами. Эти сведения легли в основу построения моделей распределения напряжений, оценки устойчивости пород и выявления зон, подверженных деформациям.

Важным этапом являлась обработка сейсмических данных с целью построения распределения скорости продольной волны и оценки акустического импеданса, что позволило более точно охарактеризовать физические свойства горного массива. Полученные данные использовались для построения геомеханической модели и интерпретации структуры пород.

Таким образом, методическая часть диссертационной работы опиралась на интеграцию сейсмических и геомеханических методов, обеспечивая комплексный подход к оценке состояния массива и позволяя обосновать рекомендации по обеспечению устойчивости подземных выработок.

4.1 Методика и техника проведения опытных сейсморазведочных исследований

Опытные 2D сейсморазведочные работы на руднике Жомарт проводились в пределах Жанааркинского района Улытауской области, на участках, представляющих интерес в контексте изучения напряженно-деформированного состояния массива пород над подземными горными выработками (рисунок 4.1). Целью работ являлось получение высокоточной информации о геологическом строении и локализации зон разрушения и деформации пород над погашенными панелями. Объектом наблюдений

послужили целевые горизонты, расположенные на глубинах от 455 до 625 метров. Общая протяженность профилей составила около 8000 погонных метров [39].

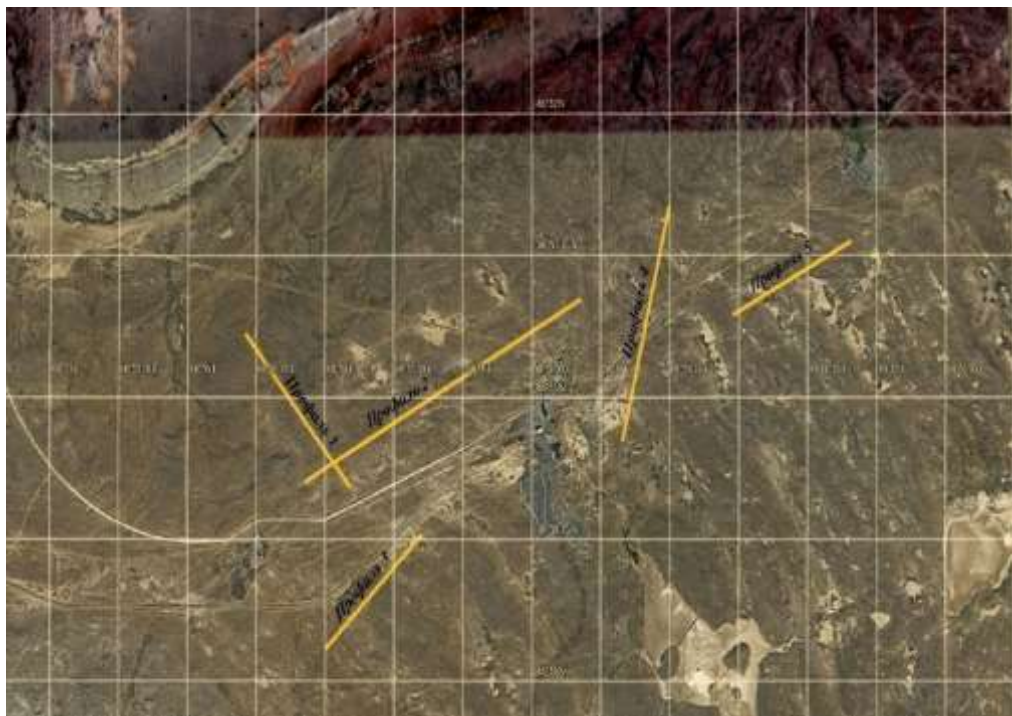


Рисунок 4.1 – Схема расположения площади исследований

Выполненные сейсморазведочные работы основывались на методике МОГТ (метод общей глубинной точки), которая позволила достичь высокой кратности наблюдений — от 10 до 32, в зависимости от конфигурации профиля. Это обеспечило улучшение сигнала при одновременном снижении шумовой составляющей. В частности, на профилях №2 и №3 использовалась сгущенная система возбуждающих пунктов, что дало возможность более детально изучить геологическое строение в интересующем интервале [28].

Методика проектирования профилей учитывала размеры подземных выработок — сечение целиков и штреков варьировалось в диапазоне от 40 до 85 метров. Исходя из этого, была выбрана центрально-симметричная система наблюдения с максимальным расстоянием между пунктом возбуждения и приёмом, составляющим 964 метра. Для регистрации данных применялась аппаратура SCOUT, включающая 480 групп геофонов, что обеспечивало требуемую плотность данных и высокую производительность работ.

Для построения маршрутов профилей проводилась предварительная топографическая съёмка, составление модели горных выработок, согласование маршрутов с учетом техногенных помех и объектов инфраструктуры. Конфигурация профилей окончательно утверждалась на местности и не подвергалась изменениям. Допускалось варьирование шага

между пунктами возбуждения (ПВ) для повышения разрешающей способности в зонах интереса (рисунок 4.2).

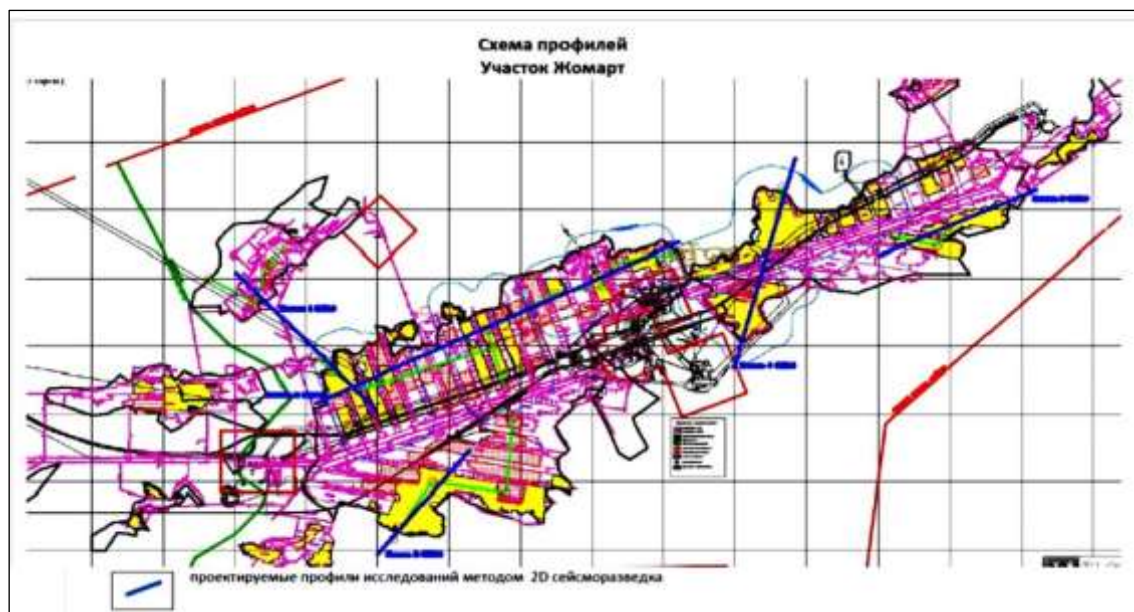


Рисунок 4.2 – Схема расположения обрабатываемых профилей

Система наблюдений проектировалась в формате SPS, с точной привязкой X, Y, Z координат всех ПВ и ПП (пунктов приёма). Расположение ПВ определялось между двумя смежными ПП. Номер ПВ соответствовал номеру ПП с меньшим значением (например, ПВ1001 размещён между ПП1001 и ПП1002). В целях уменьшения интерференционных помех предусматривался вынос ПВ на 40 метров, центрально по профилю, данные с которых впоследствии исключались при обработке. Методика наблюдений указана в таблице 4.1.

Особое внимание уделялось опытным полевым испытаниям, предшествующим основной съемке. На характерном участке площади был сформирован контрольный профиль, на котором в течение 5 дней выполнялись работы по исследованию волнового поля, подбору параметров возбуждения и регистрации, выбору амплитудных и частотных характеристик. Основным критерием оптимальности возбуждения являлось сохранение максимального частотного диапазона при заданной длине записи — 1 секунда, с шагом дискретизации 0,5 мс.

Полевые сейсмические исследования направлены на определение следующих объектов: отражающие поверхности, характеризующие зоны обрушения; области значительного смещения налегающих пород; зоны плавного прогиба. Это позволило уточнить морфологию и пространственное положение деформированных участков, связанных с процессами выемки руды. Описание структурных форм обрушений и прогибов представлено схематично на рисунке 4.3.

Таблица 4.1 - Параметры наблюдений

	Наименование параметров	Значения
	Номинальная полная кратность	24
	Количество активных каналов	480
	Шаг пунктов приема (ПП) вдоль профиля	4
	База группирования [м]	По результатам
	Тип системы наблюдений	Центральная-
	Расстановка каналов	1-240 x 241-480
	Распределение удалений (offsets)	-964 ~ (-8)-(+8) ~ (+964)
	Минимальное удаление "взрыв-прибор"	8 м
	Максимальное удаление "взрыв-прием"	964 м
	Шаг пунктов возбуждения (ПВ)	40
1	Необходимое количество каналов в полевой партии	960
	Общая длина профилей [км]	8 п.км
	Количество ПВ на площади съёмки	200
	Тип источника колебаний	Взрывной
	Глубина заряда	от 5 до 10м
	Вес заряда	по результатам опытных работ
	Электродетонатор	ЭДС-1
	Взрывчатое вещество	Петроген

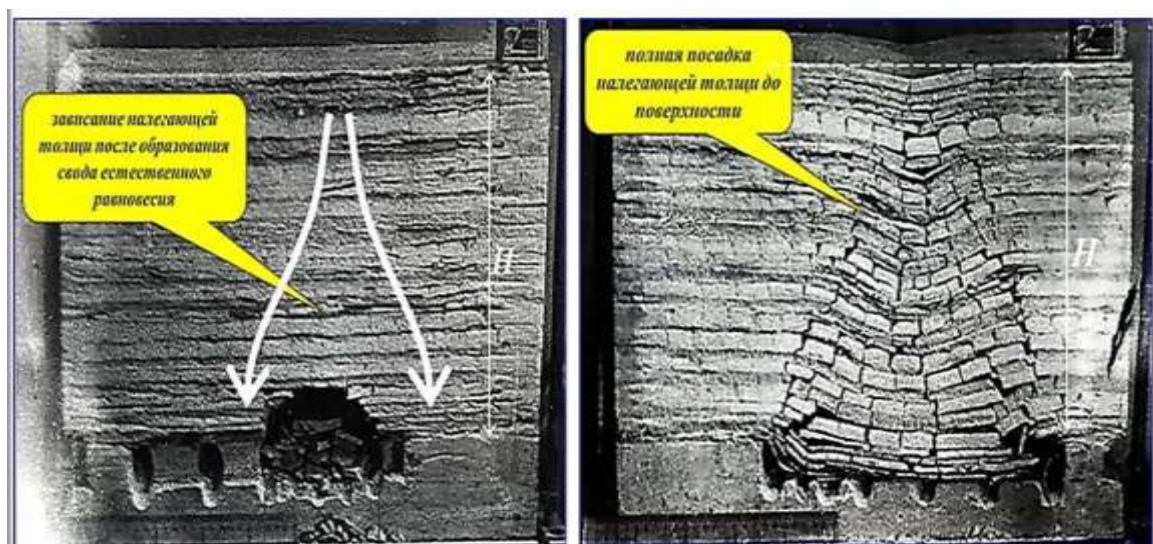


Рисунок 4.3 – Примеры структурных форм нависания и обрушения сводовой части транспортных и конвейерных штреков

При регистрации сейсмосигналов обеспечивалась строгая калибровка оборудования. Аппаратура SCOUT прошла обязательное предполевое тестирование. Геофоны проверялись на полярность (при легком ударе –

положительный всплеск на записи), сопротивление изоляции (не менее 5 МОм при 500 В), фазовый сдвиг (менее 0.25 мс на частоте 10 Гц). Все параметры и результаты поверки заносились в журнал технического контроля. Регламентные проверки проводились ежедневно и ежемесячно, а также перед началом смены [29].

Для снижения шумовых помех транспорт регистрирующего отряда находился на расстоянии не менее 100 метров от профиля, а двигатели отключались в момент съёмки. Уровень фонового шума регистрировался в начале и конце каждой смены в микровольтах на микробар. Если уровень шума превышал допустимый порог (10 мкВ), принимались меры по подавлению или переориентировке сейсмического источника.

Дополнительно проводились работы по изучению верхней части разреза (ВЧР), включая бурение 12 скважин МСК (методика скоростного контроля) глубиной до 50 метров (рисунок 4.4). В этих точках проводились вертикальные зондирования с целью определения статических поправок и расчета глубинных моделей. Применённая методика позволила получить информацию о зоне малых скоростей (ЗМС) и скорректировать сейсмическую привязку по линии приведения (SRD).

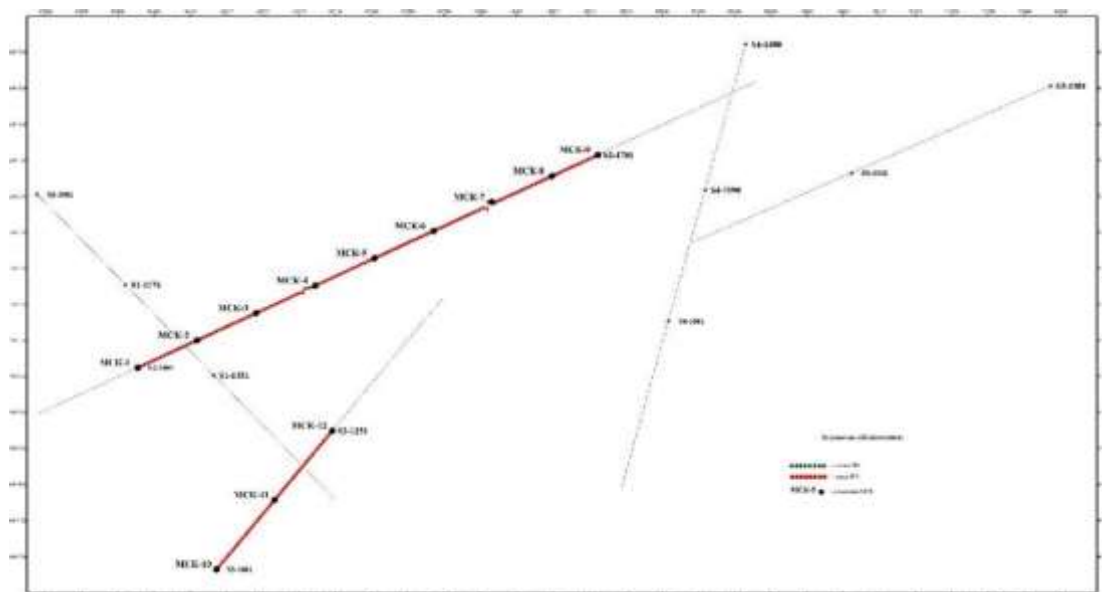


Рисунок 4.4 – Схема расположения скважин МСК

Также на месторождении применялся метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП), позволяющий получать точные скоростные характеристики по разрезу непосредственно от скважин. Методика ВСП позволила решить задачу глубинной привязки отражающих горизонтов, а также уточнить интервальные и пластовые скорости в пределах рудного поля. Работы проводились специалистами ОАО «Жезказгангеология» (Ужва В.И., Казимир В.Т., 2000 г.) в рамках проекта по теме «Результаты разведки месторождения Жомарт с подсчетом запасов по

состоянию на 15.03.99 г.». В рамках исследований было обследовано 12 скважин методом ВСП, расположенных преимущественно в пределах рудного поля, включая зоны тектонической проработки восточной прибортовой части [30].

Техника выполнения ВСП включала установку геофона в скважину и возбуждение упругих волн на поверхности. Регистрировались проходящие и отраженные волны, что обеспечивало построение временных характеристик с высокой точностью. По результатам ВСП были построены разрезы, демонстрирующие изменение пластовых и интервальных скоростей по глубине. Следует отметить, что верхнедевонские отложения не были охвачены исследованием из-за недостаточной глубины скважин, однако данные были компенсированы сведениями с соседних участков Кызылкак, Жетытау и Бестакыр, где скорости этих горизонтов варьировали от 5000 до 6000 м/с [30].

4.2 Анализ результатов интерпретации сейсмических данных

Обработка данных полевой сейсморазведки МОГТ-2D была выполнена на современном обрабатывающем комплексе системы SeisSpace-5000.0.3.1 (Landmark) (рисунки 4.5, 4.6). Целью обработки являлось детальное изучение геологического строения, выявление региональных разломов, несогласий между различными стратиграфическими горизонтами, геологических тел различной природы, а также резких литологических изменений, границ выклинивания толщ и комплексов.

Для успешного решения поставленных геологических задач особое внимание было уделено сохранению истинного соотношения амплитуд. Обработка включала ключевые этапы, такие как временная миграция до суммирования, что позволило значительно повысить точность структурного изображения [31].

Анализ полученных результатов показывает, что следующие процедуры были успешно протестированы и эффективно применены:

- Фильтрация высоких и низких частот, направленная на устранение различных видов помех;
- Деконволюция, обеспечивающая повышение разрешающей способности сигнала;
- Временная миграция, способствующая уточнению пространственного положения отражающих границ.

Таким образом, обработка данных была проведена на высоком профессиональном уровне, с применением современных алгоритмов и технологий, что обеспечило получение качественного геофизического материала, пригодного для интерпретации и последующего геологического моделирования [31].

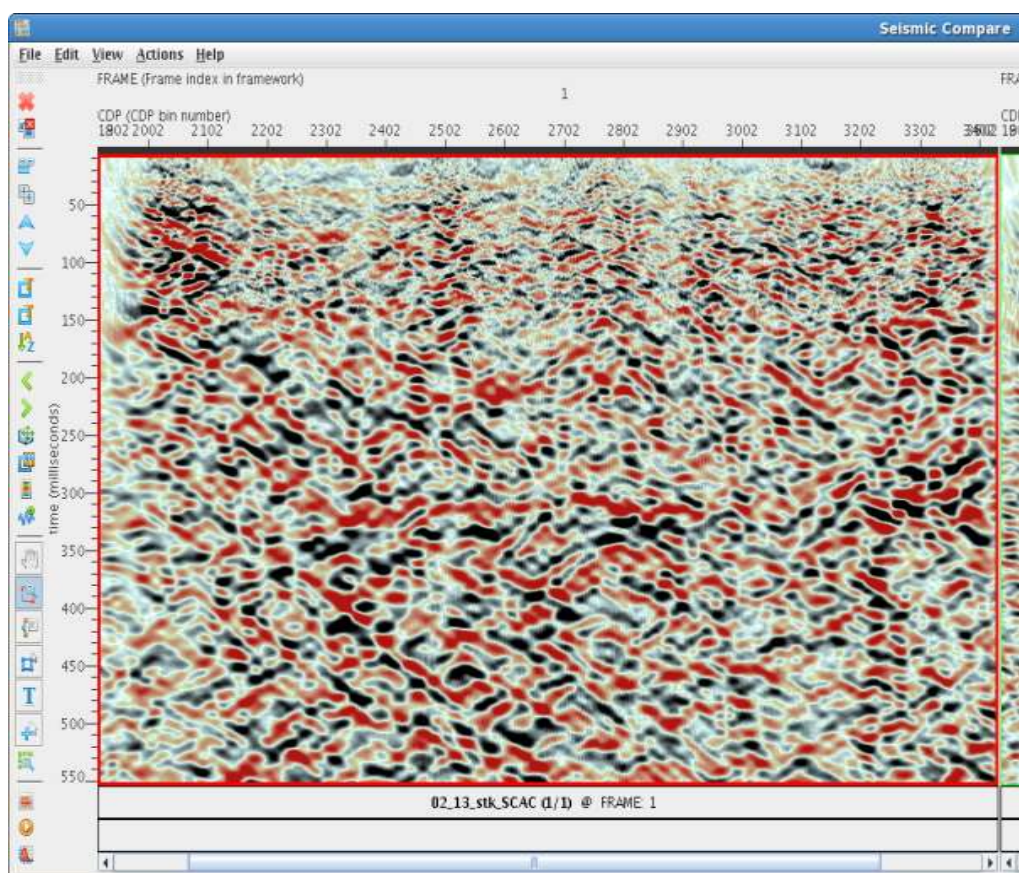


Рисунок 4.5 – Разрез до обработки по профилю_02

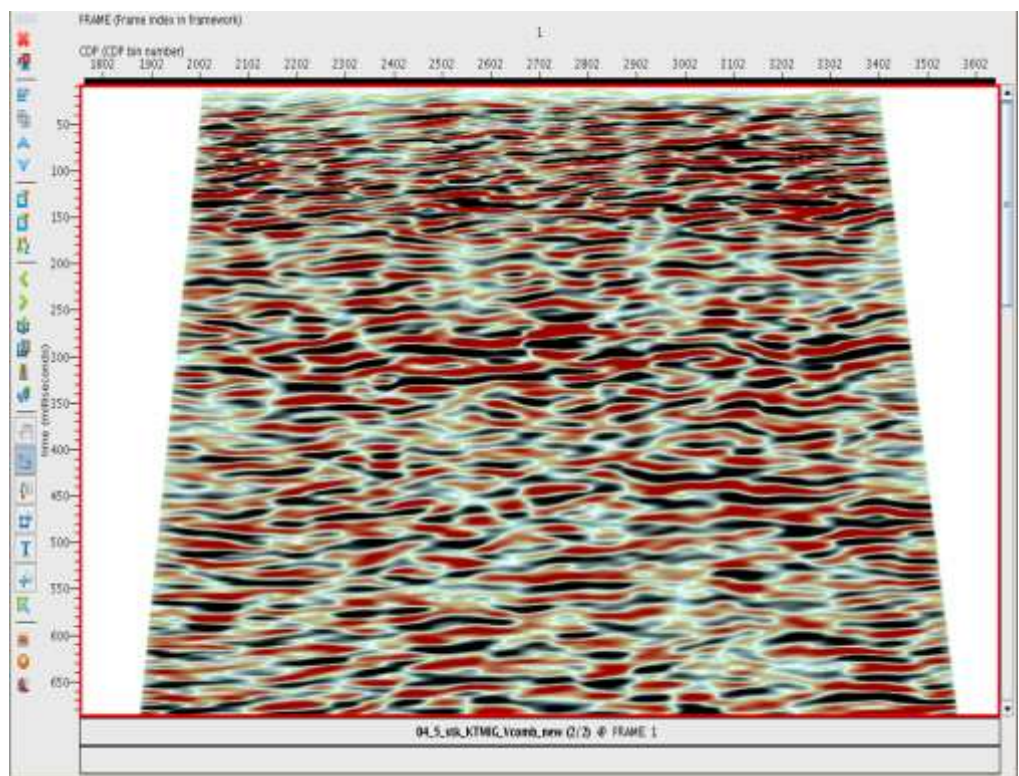


Рисунок 4.6 – Результаты обработки по профилю_02

В рамках проведённой сейсмической разведки методом общей глубинной точки (МОГТ-2D) на участке рудника Жомарт были получены как временные (рисунок 4.7), так и глубинные разрезы (рисунок 4.8), отличающиеся высоким качеством и высокой разрешающей способностью. На временных разрезах чётко выделяются отражающие границы, соответствующие основным стратиграфическим горизонтам осадочного чехла. Результаты свидетельствуют об успешной реализации процедур подавления помех, деконволюции и временной миграции, направленных на повышение информативности и достоверности геологической интерпретации.

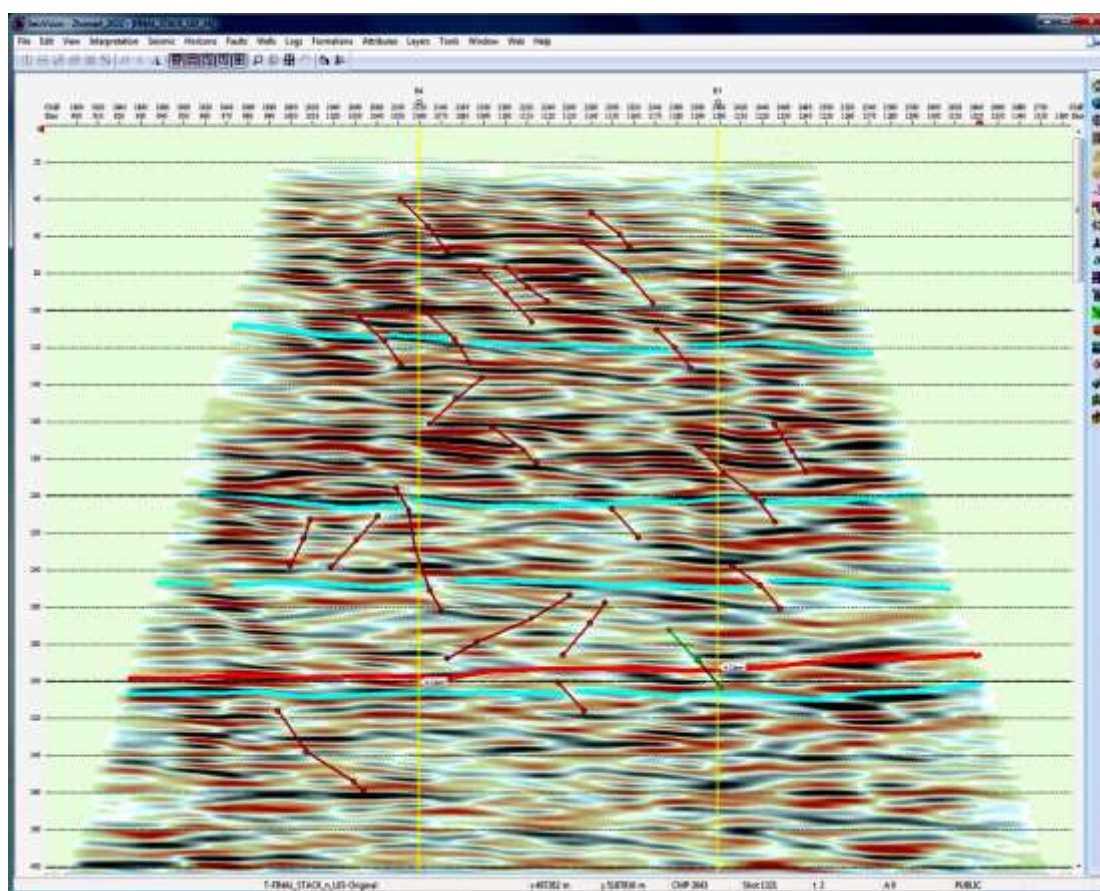


Рисунок 4.7 – Пикинг горизонтов и основных разломов на временном разрезе по профилю_03

Анализ результатов интерпретации сейсмических данных осуществлялся по двум основным направлениям:

- Выявление структурно-литологических неоднородностей в межскважинных пространствах и невыработанных зонах рудных тел на глубинах до 1000 м вдоль сейсмических профилей;
- Определение зон тектонической нарушенности и аномалий, отражающих напряжённо-деформированное состояние массива пород в районах над отработанными панелями рудника Жомарт.

Для повышения точности интерпретации особое внимание было уделено профилям 02 и 03, по которым обеспечена высокая кратность наблюдений и, как следствие, хорошее качество волновой картины. Профили 01, 04 и 05 были отстреляны с кратностью 1–2 и не обеспечивают надлежащего уровня детализации, ограничивая возможности для глубокой интерпретации [31].

В результате обработки сейсмических данных МОГТ 2Д получены временные и глубинные разрезы высокого качества. На них выделены и прослежены отражения, связанные с основными геологическими горизонтами в осадочной толще (рисунок 4.9).

В процессе обработки данных по профилям 2 и 3 была проведена построенная на основе годографов оценка двойного времени пробега волн и соответствующих скоростей распространения продольных волн. Построение годографов осуществлялось путём аппроксимации временных задержек отражённых волн в зависимости от удалённости сейсмоприёмников от точки возбуждения [31].

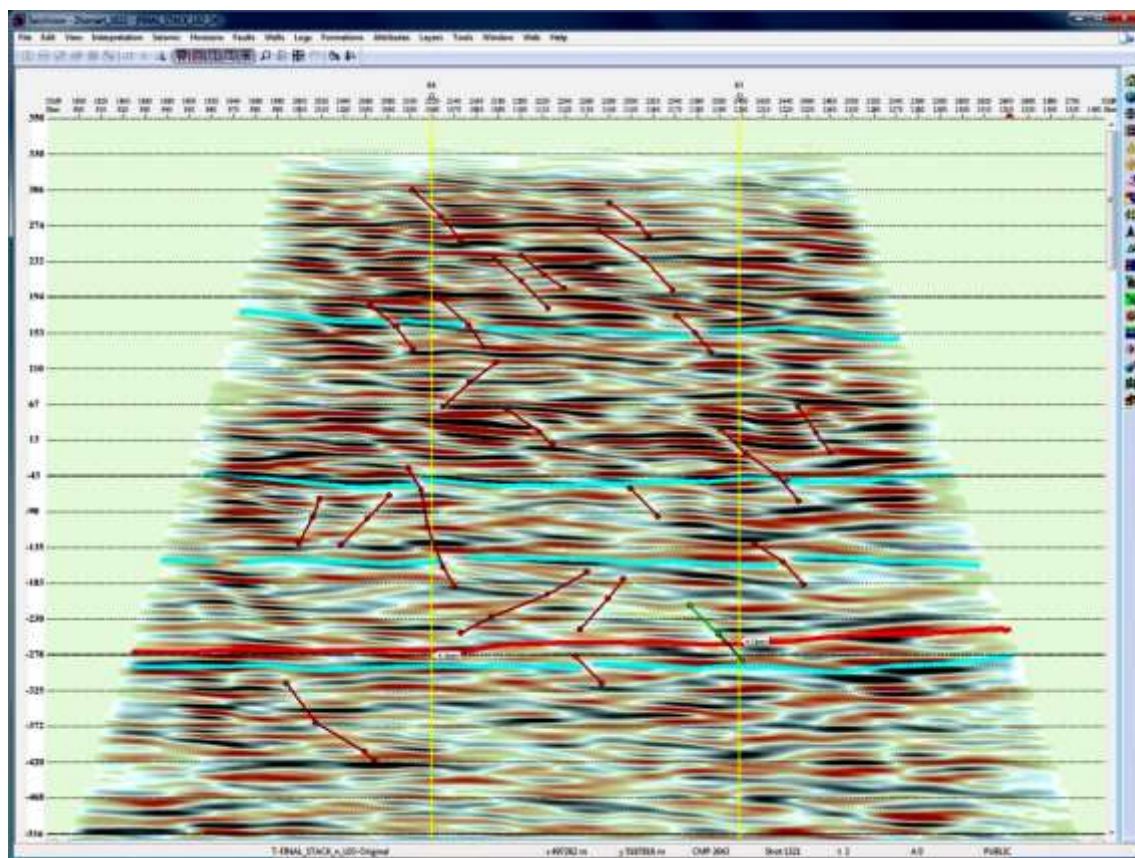


Рисунок 4.8 – Пикинг горизонтов и основных разломов на глубинном разрезе по профилю_03

Эти данные стали основой для перехода от временных к глубинным разрезам. В таблице 4.2, приведённой ниже, представлены округлённые значения скоростей и времён, использованные при расчётах глубин:

Дополнительно к данным МОГТ-2D была проведена вертикальная сейсмическая профилировка (ВСП), позволившая уточнить интервальные скорости и глубинное положение отражающих горизонтов в скважинах. Использование ВСП существенно повысило надёжность интерпретации, особенно в локальных зонах тектонических нарушений и выклинивания толщ. ВСП также обеспечила калибровку временных разрезов, что позволило соотнести их с фактическими глубинами, полученными по скважинам, и увеличить точность при построении геологических моделей (таблица 4.3).

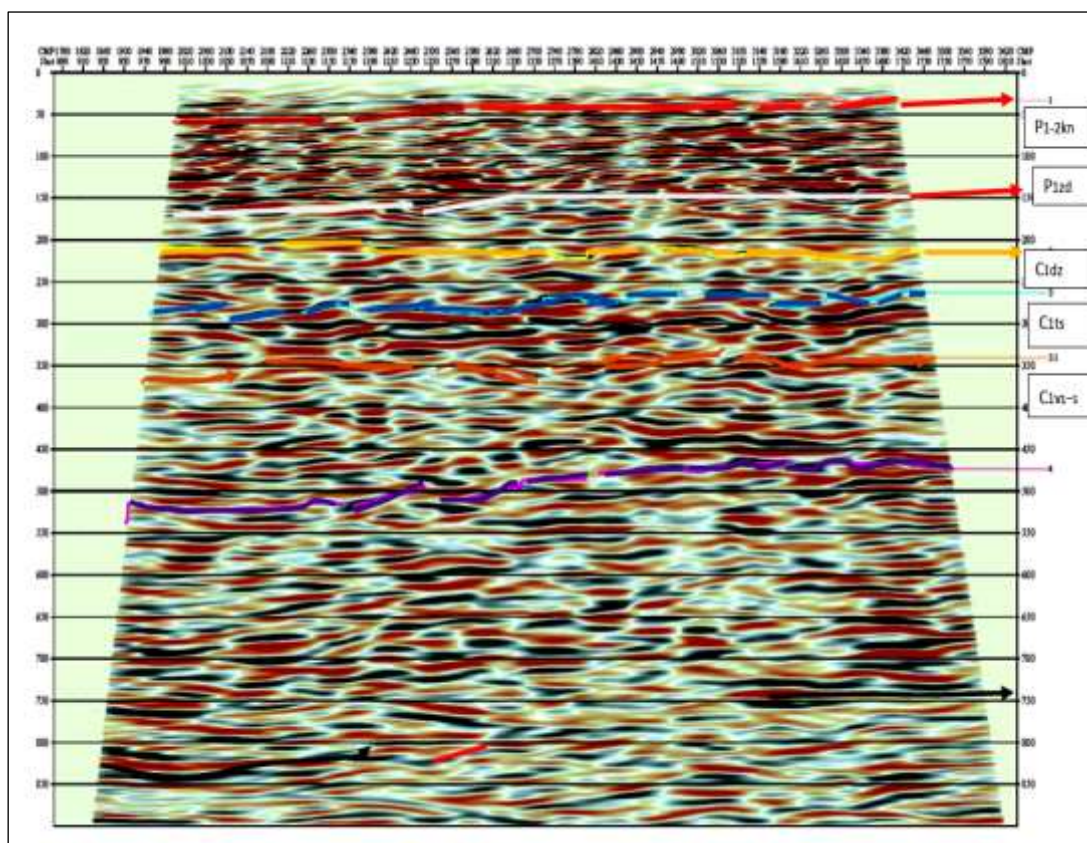


Рисунок 4.9 – Выделенные и прослеженные отражающие горизонты, соответствующие основным стратиграфическим уровням осадочной толщи

Таблица 4.2 – Округленные значения расчётной глубины по данным сейсморазведки

Двойное время пробега, мс	Скорость, м/с	Расчетная глубина по данным сейсморазведки, м
100	3000	150
200	3500	350
300	4300	645
400	5200	1040
500	5700	1425

По данным ВСП в районе месторождения **Жомарт** были выделены **пять основных отражающих горизонтов**, каждый из которых обладает стратиграфической и литологической интерпретационной значимостью:

- **R_м** — рельеф кровли терригенно-карбонатной толщи (D_3-C_1t);
- **R'_п** — кровля известняков нижневизейского подъяруса (C_1-V_1);
- **R_п** — подошва таскудукской свиты, верхневизейские–серпуховские отложения;
- **R'₁** — подошва раймундовских конгломератов (жезказганская свита);
- **R₁** — подошва низкоплотностных пермских отложений.

Наиболее устойчивыми и отчётливо прослеживаемыми являются **горизонты R_м, R'_п и R_п**, которые формируют основу стратиграфической привязки сейсмических разрезов. Граница **R'₁** была надёжно зафиксирована только на **профиле 2**, благодаря увеличенной кратности наблюдений до 48. Горизонт **R₁** прослеживается фрагментарно — преимущественно в глубоких синклинальных зонах с толстыми пермскими отложениями.

Таблица 4.3 – Характеристика пластовых скоростей продуктивных толщ в районе рудника Жомарт по данным ВСП

Воз- раст	№ скв	158	164	187	216	219	225	03	015	025	024
P_1zd		-	-	-	-	1900	2600	-	-	-	125 0
“		-	1520	-	2450	2850	3500	-	-	-	-
“		3150	3350	3150	3800	3850	4150	2500	4100	-	286 0
C_3dz		4400	4450	4300	4800	4950	4350	4330	5200	286 0	417 0
											480 0
C_2ts		4400	4450	-	4500	4350	-	5000	-	400 0	-
										470 0	
C_1vs		-	-	-	-	-	-	-	-	500 0	-

Сравнение интерпретированных данных со скоростями, полученными по результатам предыдущих ВСП (Ужва, 2000), показало высокую степень совпадения (рисунок 4.10).

Это подтверждает корректность построенной скоростной модели и надёжность результатов глубинного преобразования [31].

Проведённый анализ результатов интерпретации сейсмических данных, полученных методами МОГТ-2D и ВСП, показал высокую информативность и достоверность геофизических материалов, отражающих как

стратиграфическое, так и тектоническое строение исследуемой территории. Благодаря применению годографического анализа по профилям 2 и 3, уточнены интервальные скорости и произведено корректное преобразование временных данных в глубинные, что обеспечило надёжность пространственного позиционирования отражающих горизонтов. Установлены пять ключевых отражающих горизонтов (R_m , $R'_п$, $R_п$, R'_1 , R_1), из которых три — наиболее устойчивые — были прослежены на всём протяжении профилей.

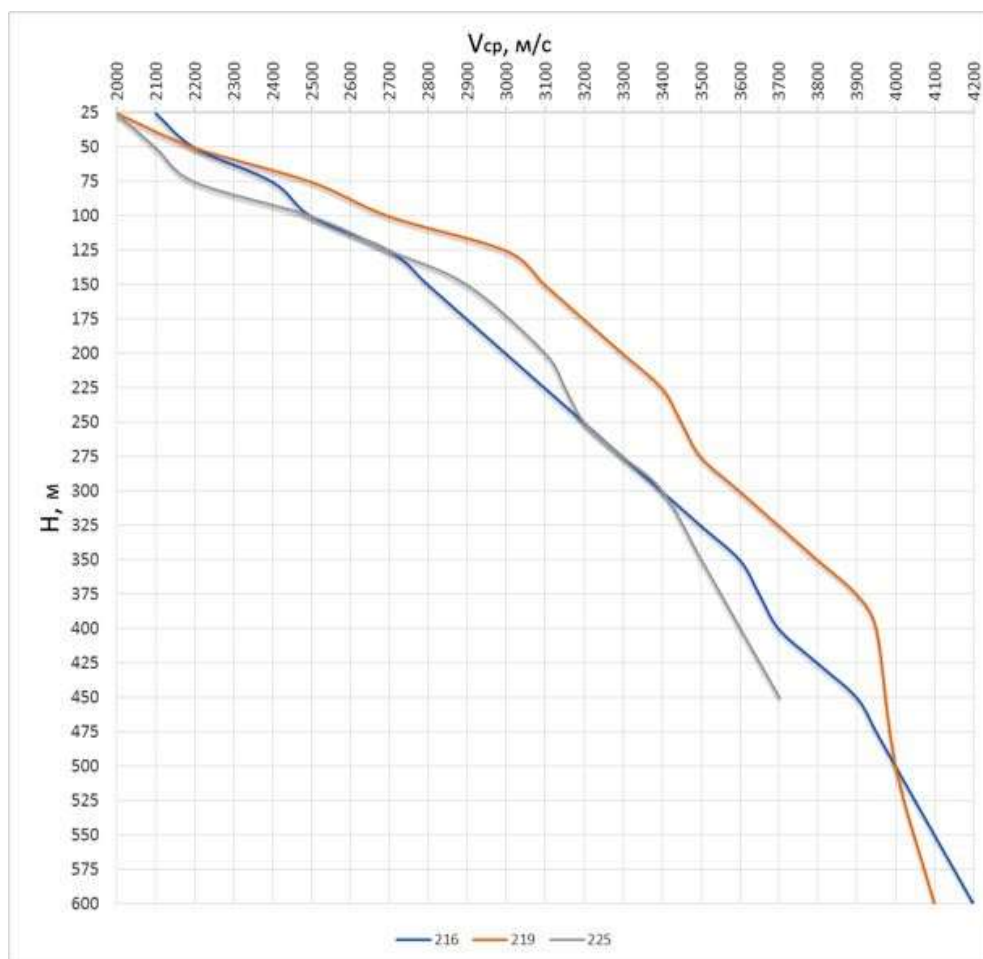


Рисунок 4.10 – Кривые зависимости скорости упругих волн от глубины по данным ВСП

Использование ВСП позволило откалибровать временные разрезы и повысить разрешающую способность интерпретации в зонах тектонических нарушений. Полученные результаты хорошо коррелируют с ранее выполненными сейсмическими и геофизическими исследованиями, включая данные ВСП, полученные на участке в 2000 году. Таким образом, комплексный подход к обработке и интерпретации сейсмической информации подтвердил свою эффективность при изучении глубинного геологического строения и тектонического состояния массива в районе рудника Жомарт [32].

4.3 Анализ данных по напряженно-деформированному состоянию массива вокруг горных выработок, полученные экспериментальными и аналитическими методами

Общие сведения об отборе горных пород для проведения испытаний. Для проведения испытаний по определению физико-механических свойств на руднике Жомарт на глубине 550 метров были отобраны 14 монолитов горных пород, представляющие, в основном, разномерный песчаник и аргиллит.

Размеры каждого отобранного монолита примерно составляли 500x1000 мм в плане, толщина 250 – 300 мм. Все вышеуказанные монолиты получены в результате буровзрывных работ при проведении горных выработок и добычи руды.

Монолиты горных пород были парафинированы, упакованы в специальные ящики и отправлены в адрес ООО «Подземгазпром» к месту изготовления образцов для проведения запланированных испытаний.

Из доставленных монолитов песчаника и аргиллита в лаборатории исследования физических свойств пород и материалов ООО «Подземгазпром» методом выбуривания были изготовлены образцы цилиндрической формы $d = 42$ мм и $d = 35$ мм при соотношении высоты образца (h) к его диаметру (d) приблизительно или точно равные двум. Иногда при наличии трещиноватости монолита некоторые цилиндрические образцы получались меньшей высоты.

Выбуривание образцов горных пород и их дальнейшая подготовка производились с учетом требований ГОСТ 21153.2-84 [40].

Часть образцов были изготовлены перпендикулярно слоистости (горизонтальная слоистость), а часть образцов – параллельно слоистости (вертикальная слоистость). Всего на 15 мая 2006 года было изготовлено 154 образца.

Проведенные работы включают определения объемного веса образцов горных пород, определение прочности при одноосном сжатии в режиме быстрого нагружения, прочности при растяжении («бразильский» метод) и определение деформационных характеристик: модуля упругости E и коэффициента Пуассона.

Определение объемного веса проводилось путем обмера образцов штангенциркулем с последующим взвешиванием их на электронных весах ЕТ – 3000-Н с точностью до 0,1 г. Показатель объемного веса пород $\rho = 2,5 - 2,7$ г/см³ для всех испытанных образцов.

В соответствии с требованиями ГОСТ 21153.2-84 определение прочности горных пород при одноосном сжатии в режиме быстрого нагружения σ_c производилось на испытательной гидравлической машине ЕУ – 100 [40].

Образец горной породы помещался на испытательной машине между верхней подвесной сферической плитой и нижней плитой, совмещая ось

образца с центром нижней опорой плиты и нагружался до разрушения с равномерной скоростью 1 МПа/с. Всего на прочность при одноосном сжатии испытано 58 образцов.

В соответствии с требованиями ГОСТ 21153.3-85 проводилось испытание цилиндрических образцов с целью определения предела прочности при одноосном растяжении в направлении перпендикулярном к заданному продольному сечению образца [41].

Сущность метода, который в практике получил название как «бразильский метод» заключается в измерении разрушающей силы, приложенной к образцу через стальные встречно-направленные плиты испытательной машины [33].

Определения прочности горных пород при растяжении σ_p проводились на испытательной машине EU – 100 между верхней подвесной сферической плитой и нижней опорной плитой со скоростью 1 МПа/с.

Всего испытано на прочность при растяжении 40 образцов.

Эти определения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 28985-91 [42]. Сущность метода заключается в измерении сжимаемой силы, приложенной к торцам образца, продольных и поперечных деформаций его, вызванных этой силой. Этот метод предусматривает предварительное определение предела прочности при одноосном сжатии испытываемой породы σ_c по ГОСТ 21153.2-84 [40].

Деформационные характеристики модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ определялись в диапазоне напряжений (0,05 – 0,5) σ_c методом «нагрузки-разгрузки» на испытательной машине EU – 100 на образцах горных пород, снабженных датчиками продольных и поперечных деформаций.

Деформации образцов регистрировались не менее, чем при десяти значениях напряжений сжатия в процессе нагружения до максимального значения σ_i и при последующей разгрузке до σ_0 не менее, чем при десяти значений напряжений.

По результатам этих испытаний на основе зависимостей «напряжение σ – деформация ε » по известным формулам определялось значение модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ . Всего было проведено 13 испытаний образцов аргиллита и песчаника.

Изучение напряжённо-деформированного состояния массива горных пород на месторождении Жомарт проводилось в 2013 году на стадии доразведки участка Жомарт II.

Работы выполнялись по заданию ТОО «Центргеоаналит» в сотрудничестве с институтом ВНИИцветмет и Горным институтом УрО РАН. Исследования включали как лабораторные, так и полевые испытания с целью определения прочностных и деформационных характеристик слагающих пород, а также распределения напряжений в массиве [34, 43].

На первом этапе были выполнены лабораторные испытания серого песчаника — основной породы в зоне разработки. Образцы цилиндрической

формы были отобраны с помощью установки алмазного бурения HILTI DD 130 RIG, диаметром 35 и 46 мм. Испытания проводились на электромеханическом прессе Zwick (максимальная нагрузка 250 кН) и гидравлическом прессе Toni/Norm (до 5000 кН), что обеспечивало выполнение испытаний в соответствии с требованиями жёсткого нагружения, необходимого для точного воспроизведения условий деформирования пород.

Измерение и первичная обработка параметров (нагрузка, деформация, разрушение) проводились с использованием программного комплекса «Пресс». Все испытания соответствовали действующим нормативам и стандартам по определению механических свойств горных пород.

В рамках тех же исследований, проведённых ТОО «Центргеоаналит», ВНИИцветмет и Горным институтом УрО РАН в 2013 году, была реализована программа полевых натурных измерений напряжений методом щелевой разгрузки на участке Жомарт II. Целью являлось определение действующих напряжений в краевой части массива, на контурах выработок и междукammerных целиках [34, 44].

Методика включала установку двух реперов на стенке выработки и последующее прорезание прямоугольной щели с помощью пилы Stihl GS 461 с алмазной цепью. Исходное расстояние между реперами составляло ~300 мм. После создания щели регистрировалось смещение между реперами в условиях частичной разгрузки массива. Это позволило оценить величину предварительных напряжений, существовавших в породах. Измерения проводились на глубине около 650 м.

4.4 Методика обработки данных сейсморазведки по получению распределения скорости продольной волны и акустического импеданса горном массиве

Методика направлена на определение распределения скоростей продольных и поперечных волн, акустического импеданса и последующий расчёт упругих параметров горных пород по данным полевой сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ-2D), с учетом данных ВСП [31].

Для построения разрезов использовался график эффективных скоростей, составленный с учётом данных ВСП скважин, расположенных в соседней Джекказганской синклинали.

На рисунке 4.11 приведены графики $V_{cp}(t_0)$ по скважинам 4061, 4062 и 4III. Увеличение средних скоростей, определённых по данным ВСП скважины 4III, пробурённой в своде Сарыобинской антиклинали, объясняется малыми мощностями в разрезе этой скважины низкоскоростных пермских отложений. Поэтому для построения сейсмических разрезов, где мощности пермских отложений достигают 1600 м, был принят график $V(t_0)$, осредняющий данные каротажа скважин 4061 и 4062.

По всем профилям, обработанным методом ОГТ на участке Жомарт, представлены временные и сейсмогеологические разрезы в масштабах 1:25 000 и 1:50 000 соответственно с учетом данных ВСП. Построение разрезов осуществлялось методом t_0 . Конечным результативным материалом по участку Жаман-Айбат являются карты изоглубин по опорным отражающим горизонтам RII и RIII, схемы изодаприт;. Кроме того, по подошве отложений таскудукской свиты были построены схемы изопакит.

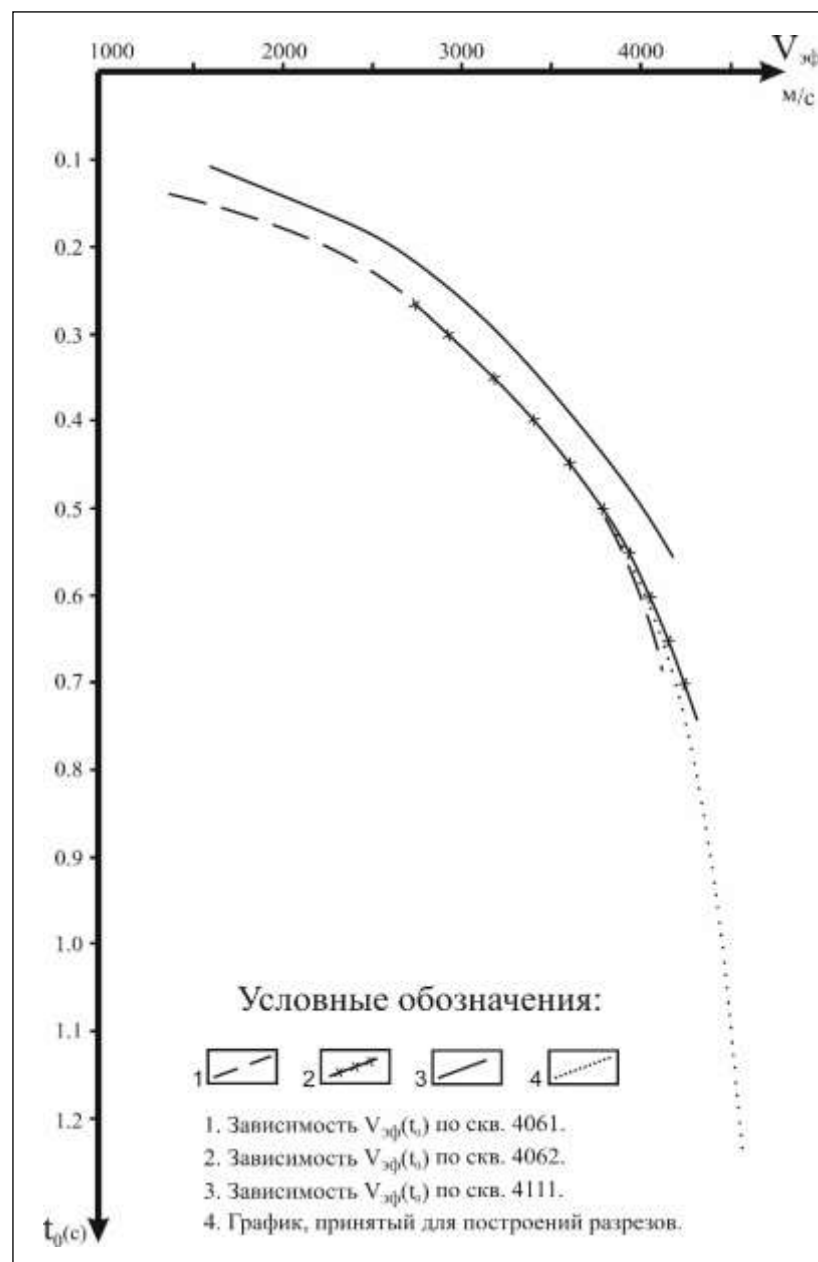


Рисунок 4.11 – Графики зависимости $V_{эф}(t_0)$. Кумолинская синклиналь

Полученные параметры используются для построения геомеханических моделей, анализа напряжённо-деформированного состояния и расчёта устойчивости горных выработок [5, 35].

По рассчитанным значениям скорости V_p и плотности породы ρ определяется акустический импеданс Z :

$$Z = \rho \cdot V \quad (1)$$

где Z — акустический импеданс, кг/(м²·с);

ρ — плотность среды, кг/м³ (в расчетах принято $\rho = 2700$ кг/м³);

V — скорость распространения упругой волны, м/с.

Распределение акустического импеданса позволяет выявить резкие контрастные границы между слоями различного литологического состава, зоны возможной трещиноватости или обводнённости, а также уточнить стратиграфическое построение.

По скорости упругой продольной волны рассчитан динамический модуль упругости массива:

$$E = V_p^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \quad (2)$$

где $\gamma = 2700$ кг/м³ — плотность толщи пород;

g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²);

ν — коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона рассчитывается по формуле:

$$\nu = \frac{a^2 - 2}{2(a^2 - 1)} \quad (3)$$

где $a = V_p / V_s$ (отношение скоростей продольных и поперечных волн).

Коэффициент Пуассона толщи пород постоянен и равен 0,24 с коэффициентом вариации всего 2%. Модуль упругости с глубиной постоянно увеличивается за счет затухания процессов выветривания и уплотнения пород с глубиной [5, 35].

Модуль сдвига определяется формулой:

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (4)$$

Модуль всестороннего сжатия:

$$K = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \quad (5)$$

Коэффициент Пуассона, модуль Юнга и другие параметры важны для расчёта напряжённого состояния, особенно при повторной разработке. Существенно учитывать разницу жёсткости руды и вмещающих пород в трещиноватых и обводнённых зонах [35].

5 Результаты работ

5.1 Установление корреляционных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами и скоростными характеристиками горного массива

Изучение взаимосвязей между статическими (лабораторными) и динамическими (полевая сейсморазведка) параметрами горных пород представляет собой ключевую задачу в формировании геомеханической модели месторождения.

Такой подход позволяет не только валидировать полученные сейсморазведочные данные, но и экстраполировать физико-механические свойства массива на участки, где непосредственные лабораторные испытания невозможны.

В рамках настоящих исследований были выполнены комплексные лабораторные испытания образцов песчаника, отобранных из различных участков массива. Согласно результатам испытаний, предел прочности при одноосном сжатии варьировался в интервале от 28,8 до 169,5 МПа, при этом среднее значение составило 96,2 МПа.

Следует отметить, что при расчёте учитывался коэффициент формы, отражающий геометрию и трещиноватость образцов. Модули упругости и деформации в среднем имели близкие значения — 19,3 ГПа и 18,7 ГПа соответственно, что указывает на относительную упругую однородность породы при условиях лабораторной нагрузки (таблица 5.1).

Результаты статистической обработки сведены в таблицу 5.2

В скобках указано количество образцов, по которым был произведен статистический расчет.

Из данных таблицы 5.2 можно сделать выводы о более высокой прочности σ_c аргиллита (образцы с горизонтальной слоистостью) по сравнению с песчаником. Испытания на прочность при растяжении σ_r и определении модуля упругости E также показали более высокие значения σ_r и E аргиллита по сравнению с песчаником.

Кроме того, следует отметить значительный разброс значений показателей механических свойств испытанных горных пород, характеризующийся коэффициентом вариации $V = 0,3$ для испытаний на прочность при сжатии σ_c ; $V = 0,30 - 0,4$ по испытаниям на прочность при растяжении σ_r и $V = 0,4$ по испытаниям по определению модуля упругости E .

Результаты испытаний образцов аргиллита с естественной или техногенной трещиноватостью показали значительное уменьшение показателя σ_c по сравнению со стандартными образцами.

Параллельно с лабораторными измерениями были проведены оценки напряженно-деформированного состояния массива методом щелевой разгрузки (таблица 5.3).

Таблица 5.1 – Испытание механических свойств серого песчаника в лабораторных условиях [33]

№ пр.	№ обр.	Размер, мм	$\sigma_{сж.},$ МПа	$\sigma_{дл.},$ МПа	$\varepsilon_{пр.},$ %	$\varepsilon_y,$ %	$D_{пр.},$ ГПа	$D_y,$ ГПа	E, ГПа	M, ГПа
1	1	92*46	135,3	123,4	0,47	0,40	29,0	27,6	28,6	144,1
1	3	46*46	124,4	135,7	0,98	0,70	17,5	18,2	14,8	84,1
Среднее			129,8					22,9	21,7	
2	1	35*35,5	84,6	64,9	1,72	0,98	6,8	9,9	7,4	9,7
2	2	35*35,5	95,0	83,7	1,55	0,91	8,5	13,4	7,9	19,0
2	3	70*35,5	55,9	38,9	0,28	0,04	20,0	16,9	25,3	19,7
2	4	70*35,5	98,7	75,6	0,34	0,17	29,0	24,5	24,9	162,4
2	5	70*35,5	164,5	149,1	0,55	0,48	29,7	25,7	26,3	181,2
2	6	91*46	85,1	81,9	0,39	0,37	22,1	19,9		36,7
2	7	94*46	51,9	40,3	0,36	0,15	14,4	16,5		35,5
2	8	92*46	132,4	119,6	0,45	0,39	29,1	26,2	28,9	207,3
2	9	91*46	56,3	46,7	0,27	0,16	20,7	16,9		85,6
Среднее			91,60					18,9	20,1	
3	1	46*46	65,0	77,6	0,82	0,63	11,0	10,5		37,8
3	2	46*46	132,7	158,4	1,19	0,92	15,3	18,3	17,0	44,2
3	3	92*46	33,3		0,21		15,7		20,6	30,7
3	4	92*46	165,3	157,9	0,72	0,63	23,1	25,3	21,66	207,3
3	5	92*46	90,7	79,6	0,52	0,42	17,3	17,4		403,7
3	7	92*46	169,5	144,3	0,72	0,60	23,5	24,5	20,9	111,5
Среднее			109,4					19,2	20,0	
4	1	46*46	89,2	113,3	0,87	0,79	14,1	12,0	13,0	49,7
4	2	46*46	108,3	132,9	0,87	0,69	17,2	17,9	19,8	258,3
4	3	47*46	74,3	89,3	0,80	0,55	12,8	13,5	13,1	57,6
4	4	92*46	74,7	59,5	0,28	0,19	26,8	21,8		53,6
4	5	92*46	28,8	26,8	0,06	0,04	48,3	15,2		161,8
Среднее			75,1					16,1	15,3	

Вертикальные напряжения от вышележащих пород составляли порядка **17,5 МПа**. Полученные значения продемонстрировали значительную изменчивость: вертикальные напряжения: от **–21,0** до **28,5 МПа**; горизонтальные напряжения: от **–1,8** до **30,8 МПа**. Такая вариативность обусловлена сложной **трещиноватой и блочной структурой массива**. Для повышения достоверности и детализации распределения напряжений дополнительно было применено **численное моделирование методом конечных элементов**.

На основании совокупных данных установлено, что **максимальные горизонтальные напряжения ориентированы перпендикулярно простиранию рудных тел**, в то время как **минимальные (до 16,2 МПа)** — вдоль их простирания. Это открывает возможность целенаправленного проектирования горных выработок с учётом направлений напряжённого состояния.

Таблица 5.2 – Результаты статистической обработки [32]

		Аргиллит		Песчаник т/з	Образцы с трещ.	
		вертик. слоист.	горизонт. слоист.	вертик. слоист.	аргиллит, горизонт. слоист.	песчаник т/з
Среднее арифметическое значение	$\sigma_{сж}$, МПа	91,9 (4)	218,1 (26)	110,3 (17)	47,5 (4)	110 (2)
	σ_p , МПа		14,2 (17)	9,4 (15)	10,0 (7)	
	Модуль упр., $E \cdot 10^{-4}$		3,8 (6)	2,2 (7)		2,8 (2)
	Коэффициент Пуассона, μ		0,2 (6)	0,2 (5)		
Среднеквадратическое отклонение	$\sigma_{сж}$, МПа	26,3 (4)	65,6 (26)	33,0 (17)	10,4 (4)	
	σ_p , МПа		3,8 (17)	4,1 (15)	4,4 (7)	
	Модуль упр., $E \cdot 10^{-4}$		1,6 (6)	1,1 (7)		
	Коэффициент Пуассона, μ		0,05 (6)	0,01 (5)		
Коэффициент вариации	$\sigma_{сж}$	0,3	0,3	0,3	0,2	
	σ_p		0,3	0,4	0,4	
	Модуль упр.		0,4	0,4		
	Коэффициент Пуассона, μ		0,2	0,06		

Выработки вдоль рудных тел меньше подвержены давлению, тогда как поперечные — испытывают максимальные напряжения и требуют усиленного крепления. Учет направлений напряжений позволяет адаптировать крепь и повысить безопасность подземных сооружений.

Таблица 5.3 – Результаты определения напряжений методом щелевой разгрузки [33]

№ Замера	Ориентация щели, м	Модуль упругости, ГПа	Расстояние между реперами до разгрузки	Расстояние между реперами после разгрузки, мм	Деформация, мм	Напряжение, МПа
<i>Замерная станция № 1</i>						
1	Вертик.	21,7	5,050	5,16	0,110	3,3
2	Вертик.	20,1	7,773	8,393	0,620	17,2
3	Вертик.	20,5	6,803	7,000	0,197	10,9
4	Вертик.	20,5	1,000	1,560	0,560	30,8
5	Вертик.	20,5	3,540	3,710	0,170	9,4
6	Вертик.	20,5	6,153	6,260	0,107	5,9
7	Гориз.	20,0	3,580	4,023	0,443	23,8
8	Гориз.	20,0	5,383	5,600	0,217	11,7
9	Гориз.	20,0	7,630	7,920	0,290	15,6
20	Гориз.	20,0	8,710	9,240	0,530	28,5
<i>Замерная станция № 2</i>						
10	Вертик.	20,0	2,320	2,637	0,317	17,0
11	Вертик.	20,0	9,810	9,777	-0,033	-1,8
12	Вертик.	20,0	0,877	0,930	0,053	2,9
13	Вертик.	20,0	1,537	1,730	0,193	10,4
14	Гориз.	20,0	8,630	8,630	0	0
15	Вертик.	20,0	1,327	1,603	0,276	14,8
16	Гориз.	20,0	8,360	8,497	0,137	7,4
17	Вертик.	20,0	0,857	0,467	-0,390	-21,0
18	Гориз.	20,0	1,680	1,920	0,240	12,9
19	Гориз.	20,0	1,31	1,447	0,137	7,4
21	Вертик.	20,0	9,133	9,14	0,007	0,4
<i>Замерная станция № 3</i>						
22	Гориз.	15,3	0,010	0,240	0,230	9,4
23	Вертик.	15,3	0,500	0,787	0,287	11,8
24	Гориз.	15,3	1,170	1,550	0,380	15,6
25	Вертик.	15,3	1,510	1,920	0,410	16,9

Механические свойства руд и вмещающих пород в ненарушенном состоянии исследовались на разных этапах освоения месторождения: КарПТИ (1990), ИГД им. Кунаева (2005), ООО «Подземгазпром» (2006–2007), ТОО «Центргеоаналит», ВНИИцветмет и Горный институт УрО РАН (2013). Все данные были обработаны и обобщены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Механические свойства руды и пород

	закон распределения	кол-во значений	среднее значение	стандартное отклонение	коэфф. вариации
прочность серых песчаников (руды) при сжатии, МПа	нормальный	96	120	31	26%
прочность серых песчаников (руды) при растяжении, МПа	нормальный	159	8.8	3.4	39%
модуль упругости всех типов пород, ГПа	логнормальный	120	27	13	48%
коэффициент Пуассона всех типов пород, доли ед.	нормальный	229	0.20	0.05	25%

На рисунке 5.1 приведены гистограммы, иллюстрирующие распределение механических свойств пород, их предельные значения и степень вариации. Выраженные коэффициенты вариации указывают на значительную природную неоднородность этих характеристик.

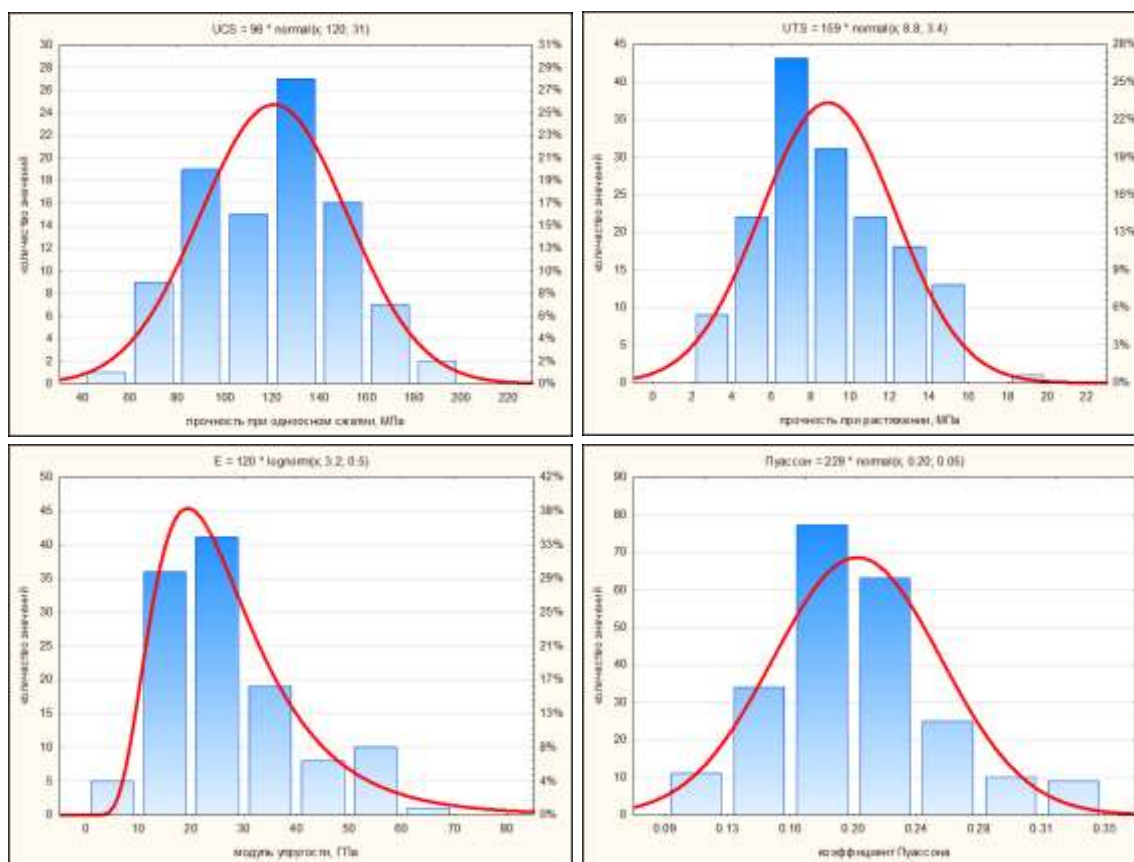


Рисунок 5.1 – Статистические распределения механических свойств руды и пород

Серый рудный песчаник представляет наибольший интерес при оценке устойчивости, поскольку именно из него сформированы все оставляемые в массиве целики. Согласно результатам исследований, этот тип породы обладает рядом особенностей, важных для прогноза её поведения под нагрузкой. Установлено, что его прочность на растяжение составляет лишь 7,2% от прочности на сжатие, что ниже порогового значения в 10%, принятого для оценки хрупкости. При этом в момент разрушения около 78% всей деформации приходится на упругую составляющую, что превышает условный критический минимум в 70% и говорит о хорошей способности материала сопротивляться необратимым изменениям формы.

Также при разрушении модуль ослабления превышает модуль упругости более чем в четыре раза, что значительно выше контрольного значения отношения $M/E > 1$. Подобное сочетание характеристик указывает на выраженную упругую природу деформирования и высокую чувствительность к накоплению разрушений, что необходимо учитывать при проектировании устойчивых целиков.

Это указывает на то, что рассматриваемая руда обладает упругими свойствами и способна накапливать потенциальную энергию в процессе деформации, а её разрушение носит хрупкий характер. Таким образом, по совокупности трёх критериев серый песчаник можно отнести к породам, склонным к проявлениям горного удара.

Одним из ключевых показателей является длительная прочность на сжатие, которая для серого песчаника составляет 86,9% от его мгновенной прочности ($\sigma_l/\sigma_0 = 0,88$), как показано на рисунке 5.2.

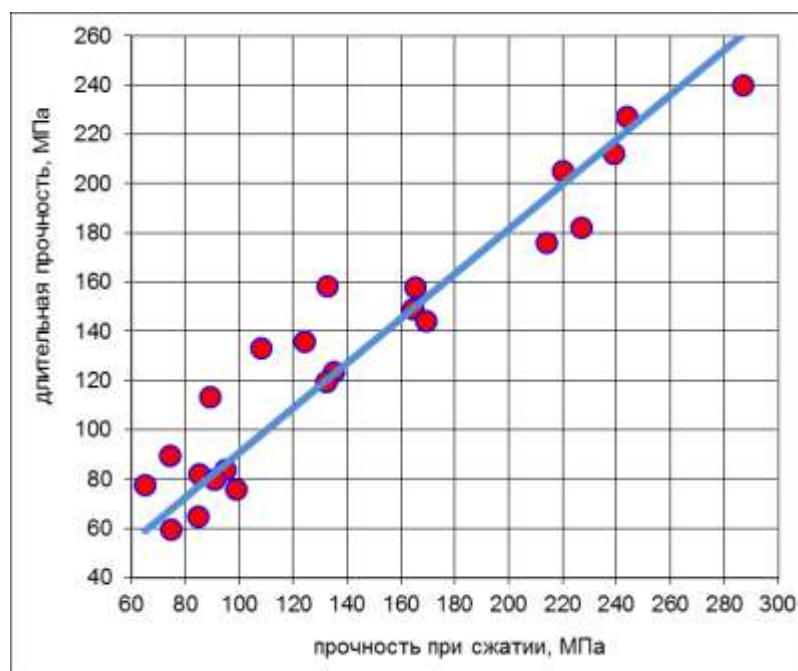


Рисунок 5.2 – Соотношение мгновенной и длительной прочности серых песчаников

Этот параметр имеет важное практическое значение. Если напряжения в породе не превышают 87% от её максимальной прочности, то процесс накопления трещин в структуре руды не запускается, и материал может сохранять устойчивость неограниченное время. Однако при превышении этого порогового уровня начинают формироваться новые трещины и через определённый интервал времени происходит разрушение образца или целика.

Устойчивость целиков напрямую зависит от величины их запаса прочности. Если он ниже критического значения 1,15, то такие целики со временем разрушаются под действием горного давления. Это особенно важно для сигнальных целиков, которые по проекту должны разрушаться спустя определённое время. В случае, если запас прочности превышает 1,15, такие целики могут оставаться стабильными практически неограниченно долго.

Рудная минерализация на руднике Жомарт приурочена в основном к слоям серых песчаников, гравелитов и конгломератов, однако промышленное оруденение формируется преимущественно в их грубозернистых разновидностях. Мелкозернистые песчаники, как правило, малорудны. Вмещающие породы преимущественно представлены разнозернистыми песчаниками от 71 до 82%, гравелитами, конгломератами от 6 до 10% и меньшим количеством алевролитов и аргиллитов от 2,5 до 3,5%.

Серые песчаники считаются наиболее прочными: их крепость по Протодяконову варьируется от 6 до 13, в среднем около 9. Прочность бурых мелкозернистых песчаников колеблется в пределах от 35 до 155 МПа, конгломератов от 80 до 145 МПа. Наименее прочные алевролиты и аргиллиты от 15 до 95 МПа, которые к тому же теряют до 60% прочности при обводнении. В отличие от них, серые песчаники и конгломераты устойчивы к воздействию влаги.

В целом, рудные и вмещающие породы месторождения Жомарт уступают по прочностным характеристикам аналогам Жезказганского района примерно в 1,5 или 2 раза. Сравнительные данные приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Сопоставление крепостей пород

Жезказган		Жомарт		соотношение
серые песчаники	$f = 13 \div 16$	серые среднезернистые песчаники	$f = 6 \div 9$	$1,9 \div 2,1$
красноцветы	$f = 7 \div 9$	алевролиты	$f = 4 \div 6$	$1,5 \div 1,8$

Средняя плотность перекрывающих пород составляет около 2,7 т/м³. Коэффициент Пуассона в этих породах равен 0,20, а стандартное отклонение составляет примерно 0,05, что соответствует коэффициенту вариации 25%.

Значения модуля упругости в продуктивной толще варьируются от 20 до 40 ГПа, при этом уровень разброса достигает 47%. Различия в упругих

свойствах между породами невелики и находятся в пределах естественной изменчивости. Поэтому все породы можно рассматривать как единую группу с усреднёнными характеристиками, отражающими общее поведение массива под нагрузкой.

Для расчётов нагруженности целиков и перераспределения горного давления при повторной разработке важно учитывать соотношение модулей деформации руд и вмещающих пород с учётом условий залегания, обводнённости и зоны выветривания. Жесткость пород оценивалась по скоростям упругих волн, полученным методом МОГТ (таблица 5.6) и ВСП.

Таблица 5.6 – Скорости упругих волн в массиве месторождения Жомарт

глубина, м	V_p , м/с	V_s , м/с	коэффициент Пуассона	модуль упругости, МПа
Скважина 216				
63	2495		0.24	411
140	3800	2250	0.23	1053
343	4290	2510	0.24	1105
511	4900	2850	0.24	1289
Скважина 219				
23	1900		0.24	238
54	3848	2250	0.24	879
190	4356	2580	0.23	1389
340	4931	2900	0.24	1595
500	4932	2910	0.23	1680
Скважина 225				
63	3530	2100	0.23	972
135	4100	2400	0.24	1018
214	4240	2500	0.23	1229
279	4337	2550	0.24	1228
370	4337	2550	0.24	1228

Помимо результатов ВСП скважин Ю-42 и Ю-54, использовался график $V_{эф}(t_0)$, составленный по результатам вычисления $V_{эф}$ по годографам отражённых волн, зарегистрированных на профилях 2 и 3. В расчёт также принимались графики $V_{ср}(t_0)$, полученные по данным ВСП скважин Г-І на структуре Бестакыр и І-ІІ на структуре Жатыктау, расположенных соответственно западнее и юго-восточнее участка Жаман-Айбат.

Все зависимости $V(t_0)$, представлены на рисунке 5.3, из которого следует, что значения эффективных скоростей увеличиваются с запада на восток. Разница по скважинам, например, Г-І (Бестакыр) и І-ІІ (Жатыктау) составляет 400-800 м/с. График эффективных скоростей, определённых по годографам отражённых волн, занимает промежуточное положение между графиками скоростей, полученными по данным скважин Г-І и І-ІІ.

Вследствие этого значения эффективных скоростей, используемых для построения разрезов на руднике Жомарт, до времени 0,5 с представляют собой усреднённые данные по скважинам Ю-42 и Ю-54, пробуренным в пределах Жаман-Айбатской антиклинали. На больших временах эти значения совпадают со значениями эффективных скоростей, вычисленных по годографам отражённых волн на профилях 2 и 3.

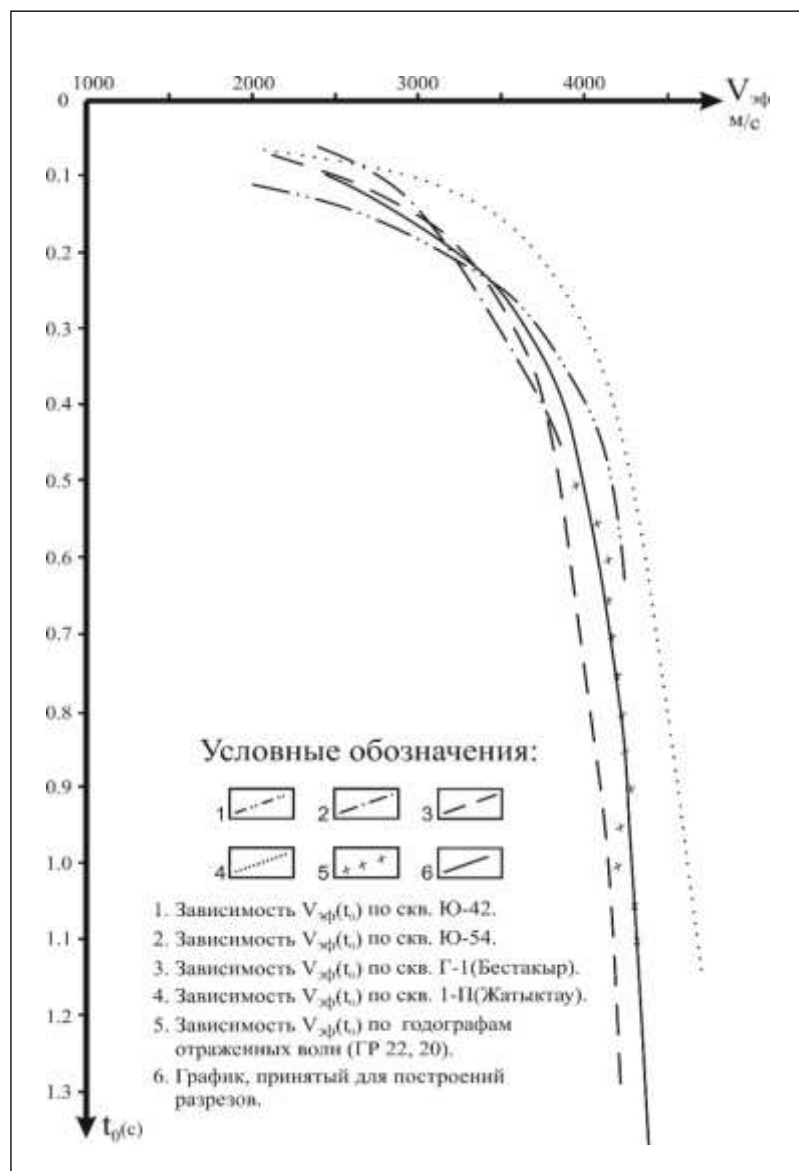


Рисунок 5.3 – Графики зависимости $V_{эф}(t_0)$. Рудник Жомарт

Коэффициент Пуассона для всей толщи пород стабилен и составляет 0,24. Его вариация не превышает 2%, что указывает на высокую однородность этого показателя. Модуль упругости увеличивается с глубиной, что связано с ослаблением выветрелых процессов и постепенным уплотнением пород (рисунок 5.4).

В пределах глубин до 500 м среднее значение модуля упругости для чередующихся осадочных пород составляет примерно 1087 МПа. Ниже этой отметки, в зоне залегания рудных тел, модуль упругости пород увеличивается и в среднем достигает 1484 МПа. Отношение упругости пород перекрывающего комплекса к рудоносной толще составляет 0,75. Аналогичная пропорция ранее была зафиксирована при исследованиях на Жезказганском месторождении, что объясняется схожими условиями формирования, а также сходством в литологическом и тектоническом строении данных участков.

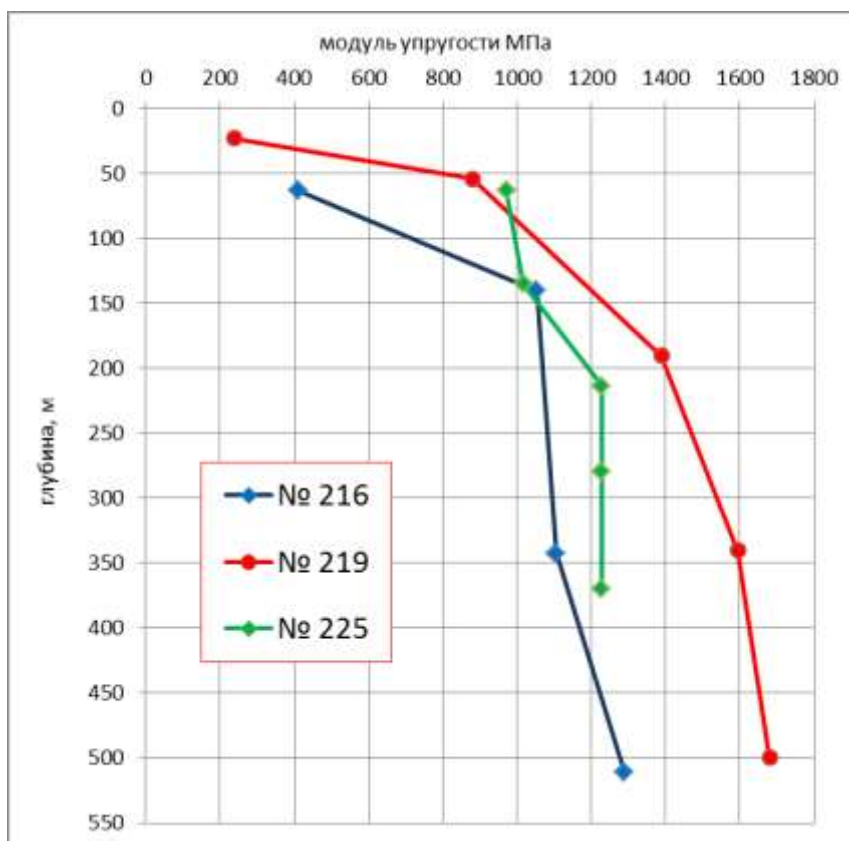


Рисунок 5.4 – Изменение модулей упругости пород с глубиной по данным сейсморазведки

Сравним полученные значения с результатами лабораторных испытаний по упругим характеристикам пород. Согласно данным таблицы 5.1, средний модуль упругости в образцах рудоносной толщи составляет 27 ГПа. При этом для массива пород этот показатель значительно ниже — динамический модуль упругости равен всего 1,5 ГПа. Таким образом, из-за развитой трещиноватости модуль упругости массива оказывается в 18 раз меньше, чем в монолитных образцах. На Жезказганском месторождении аналогичное соотношение составляет 1:22. Такое совпадение объясняется сходством геологического строения и тем, что оба объекта относятся к одному промышленному типу — месторождениям медистых песчаников.

5.2 Корректировка полученных геомеханических параметров по результатам геофизических исследований скважин и обработки данных сейсморазведки на основе распределения скорости продольной волны и акустического импеданса горном массиве исследуемого участка рудника

На этапе доразведки и подготовки к освоению северо-восточного участка рудного тела Жомарт II была проведена корректировка геомеханических параметров массива на основании результатов обработки данных сейсморазведки и буровых геофизических исследований. Основным методом определения пространственного распределения упругих свойств массива стала интерпретация скорости продольной волны и расчет акустического импеданса, что позволило получить оценку модуля упругости E по всему объему изучаемой зоны.

На основании уже полученных и интерпретированных данных по основному телу рудника Жомарт были экстраполированы модули упругости на смежный участок Жомарт II.

Данная методика предполагает, что геомеханические свойства могут быть уточнены по данным сейсморазведки, включая данные акустического импеданса и сейсмических скоростей, за счёт использования известных формул для перерасчета механических характеристик: модуль упругости (E), модуль сдвига (G), модуль объемного сжатия (K), коэффициент Пуассона (ν).

Предварительная оценка напряженно-деформированного состояния на руднике Жомарт проводилась на разных этапах разработки. Так, в 2004 году геомеханиками Казахмыса был использован метод дискования керна, а в 2013 году Горным институтом УрО РАН выполнены измерения методом щелевой разгрузки на горизонте 650 м в районе ствола «Вентиляционный-1». При плотности пород $\gamma = 2,7 \text{ т/м}^3$, вертикальное гравитационное давление составило порядка 17,5 МПа. Установлено, что максимальные горизонтальные тектонические напряжения σ_1 действуют под азимутом $156^\circ\text{--}336^\circ$, при коэффициенте бокового давления $\lambda_1 = 1,6$, а минимальные σ_3 — в направлении $66^\circ\text{--}246^\circ$, при $\lambda_3 = 0,9$. В 2018 году SRK Consulting и Казахмыс скорректировали направление тектонических напряжений: σ_1 зафиксировано под азимутом $120^\circ\text{--}300^\circ$ (рисунок 5.5).

С учетом пространственного распределения модуля упругости E , рассчитанного по сейсмическим данным, можно выполнить уточнение напряженного состояния массива, особенно в зонах между скважинами, где данные RQD и FF отсутствуют. Геомеханическое описание керна охватывает более 32 тысяч интервалов.

При геомеханическом описании керна подсчитывалось количество трещин с углами наклона к оси керна в интервалах: $0^\circ\text{--}30^\circ$ (в Жомарте — это крутопадающие трещины, секущие керн вертикальных скважин под малыми углами); $30^\circ\text{--}60^\circ$ (наклонные); $60^\circ\text{--}90^\circ$ (пологие трещины напластования и слоистости, секущие керн почти по нормали).

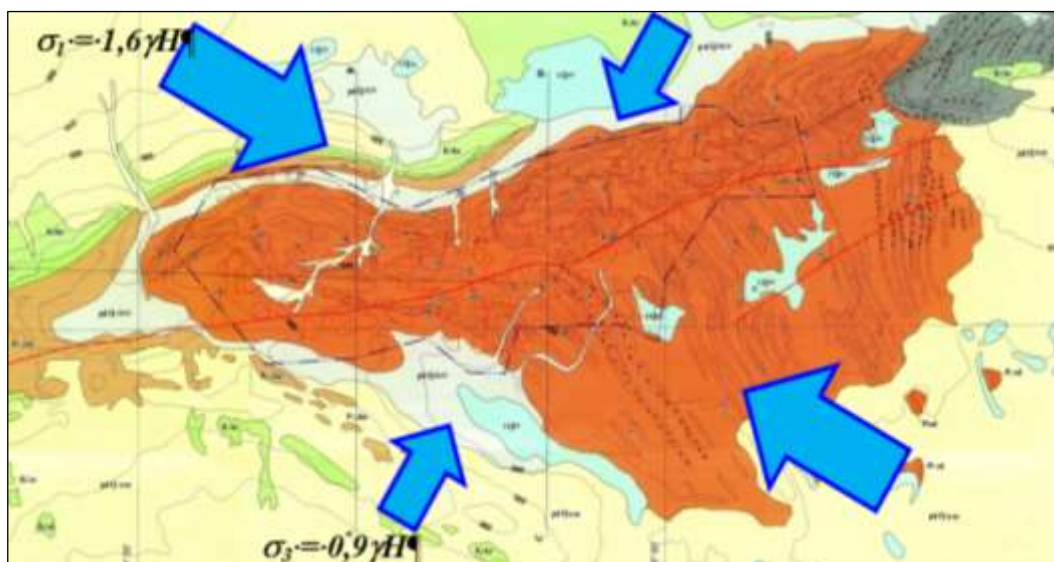


Рисунок 5.5 – Природное напряженное состояние массива месторождения Жомарт по результатам натурных измерений методом щелевой разгрузки и тектонофизического анализа

В базе данных зафиксировано более 341 тыс. трещин. Их распределение по наклону к оси вертикального керна (углам падения Dip) представлено на рисунке 5. 80% от всех зарегистрированных трещин являются пологими поверхностями напластования и слоистости. Наклонных и крутопадающих трещин — примерно по 10% (рисунок 5.6).

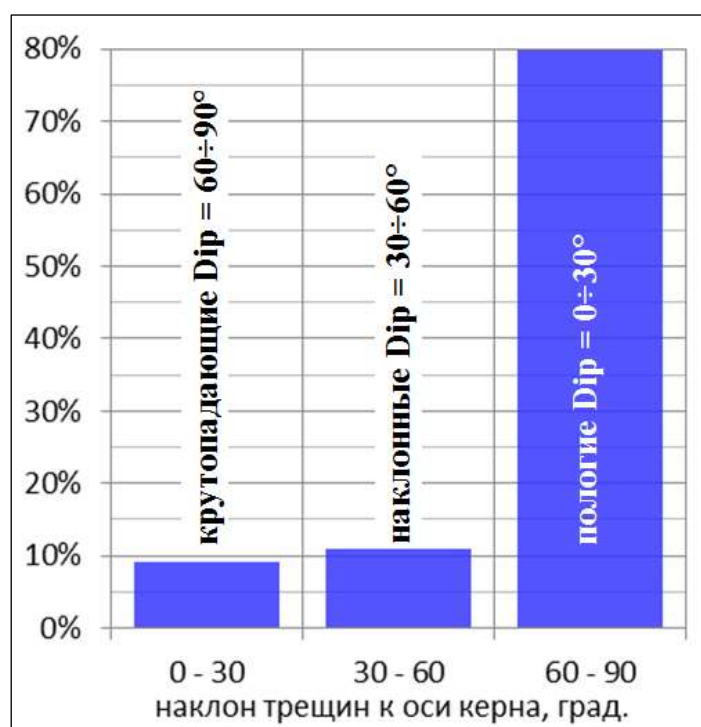


Рисунок 5.6 – Распределение трещин по углам падения Dip

Показатели нарушенности массива определялись по двум основным параметрам:

- RQD (Rock Quality Designation) — отношение длины кусков керна >10 см к общей длине, отражает целостность массива;
- FF (Fracture Frequency) — количество трещин на 1 м керна.

Анализ трещиноватости позволил построить пространственные 3D-модели распределения RQD и FF по телу рудной залежи 4-1 и породам её кровли. Визуализация и интерполяция параметров велись с использованием метода обратных расстояний (IDW), при этом модели формировались с субблокированием до $12,5 \times 12,5 \times 0,5$ м.

По результатам анализа:

- На большей части шахтного поля массив характеризуется высокой целостностью ($RQD = 95–100\%$);
- В северной части, вблизи шарнира антиклинали, RQD падает до $70–90\%$;
- В блоке 19-C2 зафиксированы экстремально низкие значения ($RQD = 30–50\%$) из-за тектонических разломов и водопритока (рисунок 5.7);
- Частота трещин в породах кровли достигает $FF = 10–40$ шт/м, что указывает на зоны с тонкоплитчатым строением и пониженной устойчивостью (рисунок 5.8).

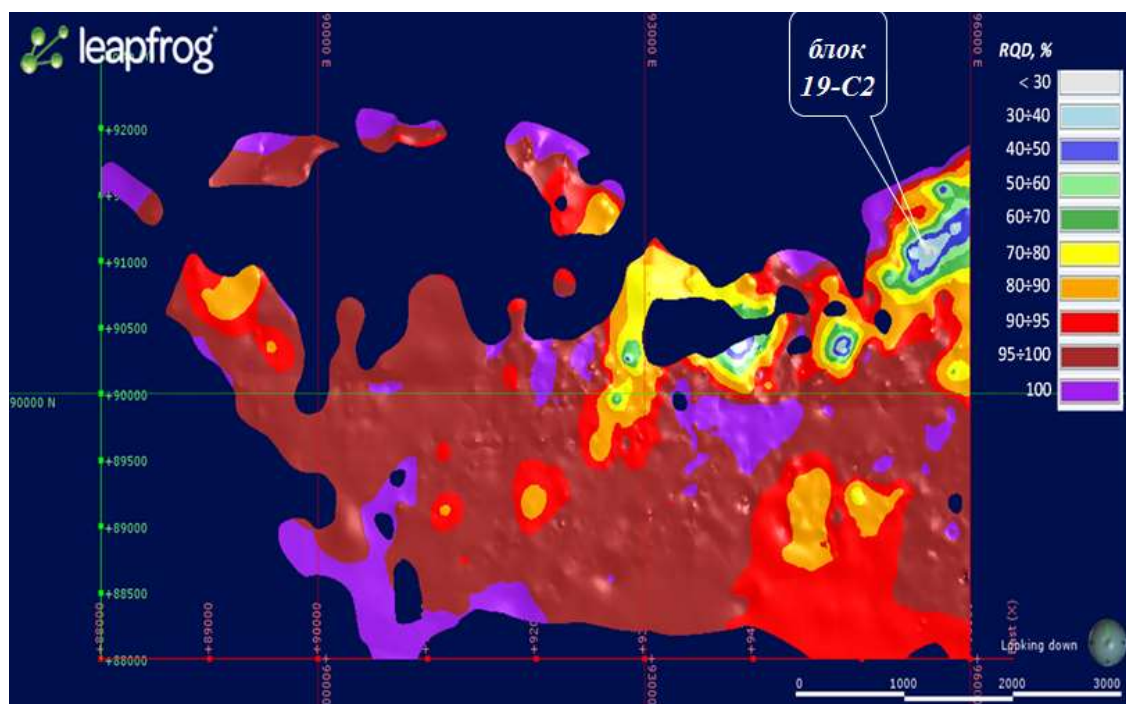


Рисунок 5.7 – Районирование шахтного поля Жомарт 2 по нарушенности (RQD) массива руды залежи 4-1

При моделировании геомеханических параметров с учетом трещиноватости установлены корреляции между модулем упругости и параметрами нарушенности. Так, при низком RQD и высоком FF

фиксируется снижение модуля E . Это позволяет использовать рассчитанные по сейсморазведке значения модуля упругости для верификации зон трещиноватости в массиве, особенно там, где отсутствуют данные по бурению.

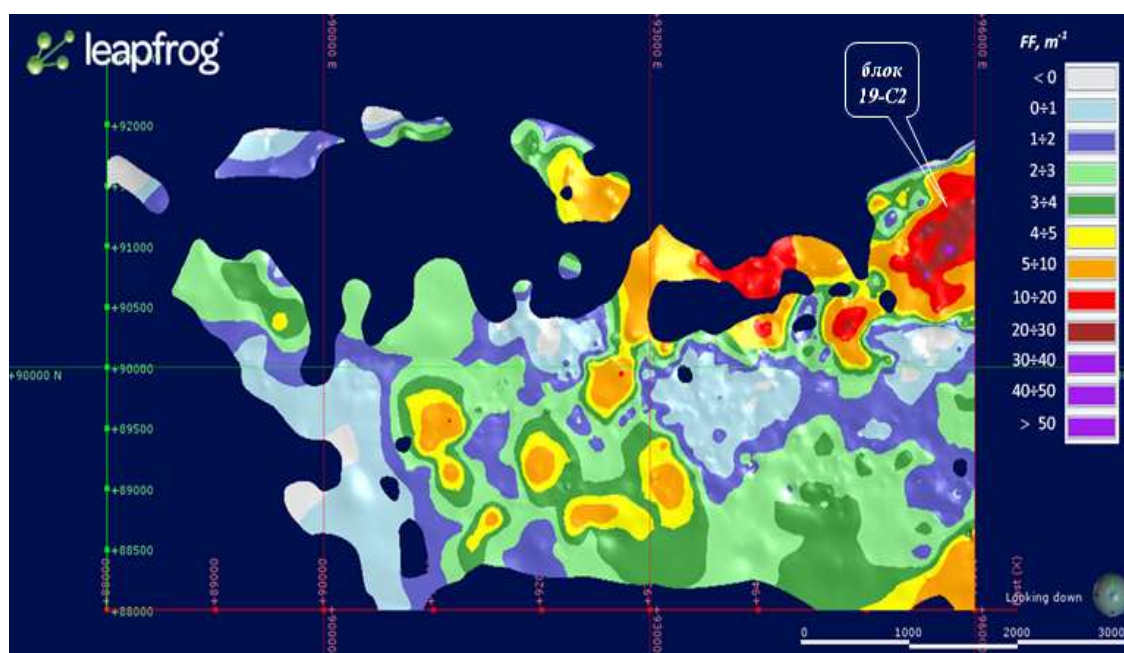


Рисунок 5.8 – Районирование шахтного поля Жомарт 2 по нарушенности (частота трещин FF) массива пород кровли залежи 4-1

Таким образом, результаты сейсморазведки, выраженные через пространственное распределение скорости продольной волны и рассчитанные на их основе модули упругости, представляют собой важный инструмент для уточнения геомеханических свойств массива в пределах северо-восточного участка рудного тела Жомарт II. По готовым расчетам на основном руднике были определены модули упругости, которые использовались для экстраполяции и перерасчёта прочностных и деформационных характеристик для новых участков.

Полученные значения модуля упругости позволяют не только пересчитывать текущее напряжённое состояние массива, изменяющееся в процессе разработки, но и служат косвенным индикатором трещиноватости, особенно в тех зонах, где данные RQD либо отсутствуют, либо недостаточно достоверны. Связь между снижением значений E и повышенной нарушенностью массива (высокая частота трещин FF , низкий RQD) даёт основание использовать модуль упругости как прогностический параметр при построении геомеханических моделей.

Дополнительно, при использовании упругих анизотропных моделей в 3D блочной интерпретации, значения E и коэффициента Пуассона ν позволяют уточнять углы падения трещин по направлению главных модулей жёсткости. Это особенно актуально в тех случаях, когда керн был

неориентирован. Анализ показывает, что высокие значения E в сочетании с преобладанием пологих трещин ($Dip\ 60-90^\circ$) могут свидетельствовать о наличии устойчивых напластований, тогда как сниженные значения E и наличие наклонных или крутых трещин ($Dip < 60^\circ$) указывают на разломные и дестабилизированные зоны массива.

Следовательно, комплексное использование полученных модулей упругости в сочетании с трещиноватостными параметрами и 3D геомеханическим моделированием позволяет существенно повысить точность прогноза состояния массива и обосновать параметры безопасной разработки рудного тела на новых участках месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы были исследованы геомеханические параметры выработанного пространства на локальном участке рудника Жомарт, расположенного в Жанааркинском районе Улытауской области. Месторождение разрабатывается камерно-столбовым способом, что требует особого внимания к устойчивости подземных выработок и состоянию массива вблизи них. Основное внимание было сосредоточено на использовании сейсморазведки, для получения достоверной информации о состоянии горных пород. Объектом работы выбран рудник Жомарт, расположенный в Улытауской области, где применена камерно-столбовая система разработки. В рамках работы разработана методика комплексного анализа геофизических и геомеханических параметров для оценки состояния массива, выявления потенциально неустойчивых зон и уточнения параметров разработки. Основные результаты исследований заключаются в следующем:

1. Обзор и анализ современных отечественных и зарубежных методов оценки текущего геомеханического состояния рудных месторождений по представленной совокупности примеров демонстрирует высокий потенциал современных геофизических методов для оценки текущего геомеханического состояния рудных месторождений. Их применение позволяет выявлять потенциально опасные зоны, управлять рисками, оптимизировать систему разработки и, главное, предотвращать аварии, сохраняя устойчивость как массивов, так и инженерной инфраструктуры. Применение сейсморазведки в сочетании МОГТ, ВСП и межскважинного просвечивания позволяет не только локализовать аномалии, но и охарактеризовать их геометрические параметры, выявить вертикальные границы и глубинное строение слабоуплотнённых зон, что делает данный подход особенно ценным для прогноза техногенных деформаций и оценки устойчивости массива.

2. Петрофизический анализ характеристик геологических комплексов рудника Жомарт выявляет высокую степень однородности разреза, закономерное распределение плотности и скорости упругих волн, а также локальные аномалии, связанные с литологическими различиями и обводнёностью пород. Полученные данные служат основой для выделения потенциальных рудоносных зон, оценки фильтрационных свойств массива и построения прогностических моделей при дальнейшей подземной разработке.

3. Горно-геологические условия разработки месторождения Жомарт формируются под воздействием целого комплекса природных факторов, среди которых важнейшими являются форма, залегание и состав рудных тел, литологические и физико-механические свойства вмещающих пород, а также структура верхних горизонтов, участвующих в формировании кровли горных выработок.

4. Детальный анализ горно-технических условий разработки месторождения Жомарт позволяет утверждать, что используемая система требует постоянной адаптации под реальные геомеханические условия. При подземной разработке рудных месторождений особую опасность представляют природные структурно-литологические неоднородности, зоны тектонических нарушений, а также индуцированные техногенные процессы, которые инициируют разрушение массива. Несмотря на улучшение параметров и снижение количества критических повреждений, остаётся необходимость в дальнейшем уточнении проектных решений, в частности, в части ширины камер, системы крепления и геомеханического обоснования прочности МКЦ.

5. Методическая часть диссертационной работы опиралась на интеграцию сейсмических и геомеханических методов, обеспечивая комплексный подход к оценке состояния массива и позволяя обосновать рекомендации по обеспечению устойчивости подземных выработок. Важным этапом являлась обработка сейсмических данных с целью построения распределения скорости продольной волны и оценки акустического импеданса, что позволило более точно охарактеризовать физические свойства горного массива. Полученные данные использовались для построения геомеханической модели и детального изучения структуры пород.

6. Данные сейсморазведки, выраженные через пространственное распределение скорости продольной волны и рассчитанные на их основе модули упругости, представляют собой важный инструмент для уточнения геомеханических свойств массива в пределах северо-восточного участка рудного тела Жомарт II. По готовым расчетам на основном руднике были определены модули упругости, которые использовались для экстраполяции и перерасчёта прочностных и деформационных характеристик для новых участков. Полученные значения модуля упругости позволяют не только пересчитывать текущее напряжённое состояние массива, изменяющееся в процессе разработки, но и служат косвенным индикатором трещиноватости.

Таким образом, работа подтверждает возможность и целесообразность применения геофизических данных для построения геомеханических моделей, адаптированных к конкретным условиям разработки. Полученные выводы и предложенные подходы могут быть полезны при проектировании и оптимизации системы разработки, а также при оценке степени риска, связанного с подработкой потенциально неустойчивых участков массива.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МСК –микросейсмокаротаж
ОЦ –обрабатывающий центр
ПМО –программно-методическое обеспечение
ПП –пункт приема
ПВ – пункт взрыва (возбуждения)
ППБВР – промышленные Правила безопасности при проведении взрывных работ
ВЦ –вычислительный
ВЧР - верхняя часть разреза
МОГТ - метод общей глубинной точки
МПВ - метод преломленных волн
ЗМС - зона малых скоростей
ЛП – линия приема
ЛВ – линия возбуждения
RTK/OTF – режим работы базовой геодезической станции
PDOP (Position) — снижение точности по местоположению
WGS 84 (англ. World Geodetic System 1984) — всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года, в число которых входит система
UTM - порядок записи координат: в проекции Гаусса—Крюгера
ВИРГ –Всесоюзный институт разведочной геофизики
ВМДС-временная миграция до суммирования
ГМДС-глубинная миграция до суммирования
ПР- Профиль
ПО -Программно математическое обеспечение
ВСП-Верикальное сейсмическое профилирование
НИР-научно-исследовательские работы
ВЦ-вычислительный центр
ВЧР-верхняя часть разрез
ГИС-геофизические исследований скважин
АК-акустический каротаж
НДС-напряжённно-деформированного состояния
МКЦ - междокамерные целики
БЦ-барьерный целик

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бондарев В.И. Сейсморазведка: учебник для вузов // Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 690 с.
- 2 Ashton C.P., Bacon B., Mann A., Moldoveanu N., Déplanté C., Dickilreson, Sinclair T., Redekop G. 3D Seismic Survey Design // Oilfield Review. – 1994. – Vol. 6. – P. 19–32.
- 3 Абетов А.Е., Умирова Г.К., Джукебаев М.И. Англо-русско-казахский словарь терминов разведочной геофизики // Алматы: EDP Н (Идипи Хаб); Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2024. – 454 с.
- 4 Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Рудная сейсморазведка // М.: Геоинформмарк, 2000. – 366 с. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров // М.: Горная книга, 2006.
- 5 Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. — М.: Горная книга, 2006.
- 6 Mayer A., Bernede J. Mesures des contraintes dans le terrain en place en roches tenders ou sensibles à l'humidité // Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech. – Lisbon: Lab. Nac. de Eng. Civil, 1966. – Vol. 2. – P. 41–44.
- 7 Голик В.И., Чжун Чан, Мельков Д.А. Геофизический контроль состояния геологической среды при техногенных воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №6.
- 8 Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования // М.: ОИФЗ РАН, 2000.
- 9 Neishtadt N.M. Piezo-electrokinetical prospecting with MORION-2001 Field Instrument // Trans. of the XVI Conf. of Israel Mineral Science and Engineer. Assoc. – 2002. – P. 8–9.
- 10 Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие // Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.
- 11 Лисин В.П., Чугаев А.В., Санфиоров И.А. Исследование потенциально опасных зон ускоренного оседания грунтовой толщи шахтных полей методами наземной и скважинной сейсморазведки // Инженерная и рудная геофизика – 2018: материалы Международной научной конференции. – Алматы, 2018.
- 12 Истекова С.А., Ан Е.А. К вопросу о применении высокоразрешающей 3D сейсморазведки на рудных месторождениях Казахстана // Труды Сатпаевских чтений. – 2019. – Т. 1. – С. 54–58.
- 13 Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Харисова О.Д., Замятин А.Л. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 255–263.
- 14 Писецкий В.Б., Лапин С.Э., Зудилин А.Э., Патрушев Ю.В., Шнайдер И.В. Методика и результаты промышленного применения системы сейсмического контроля состояния горного массива «МИКОН-ГЕО» в

процессе подземной разработки рудных и угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 58–64.

15 David W. Eaton, Bernd Milkereit, Matthew Salisbury, Erick Adam. Jianjun Wu. Mining Exploration: A New Frontier for the Canadian Seismic Industry Publisher: Society of Exploration Geophysicists. Online publication date: 8-Sep--2010.

16 Зайцев Ю.А., Габай Н.Л., Голубовский В.А., Потапочкин В.М., Мартынова М.В. Геология и полезные ископаемые Джезказганского рудного района // М.: Недра, 1975. – 284 с.

17 Сатпаев К.И. Геологическое строение Джезказганского района // В кн.: Большой Джезказган. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1961. – С. 60–81.

18 Байбатша А.Б., Кулкашев Н.Т., Бекботаева А.А., Шакирова Г.С. Перспективы Казахстана на выявление нетрадиционных типов месторождений цветных и благородных металлов // Материалы Международной конференции: Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых. – Томск, 2010. – С. 402–404.

19 Быбочкин А.М., Быховский Л.З. Комплексная геолого-экономическая оценка рудных месторождений (основы методики): монография // Москва: Недра, 1990. – 326 с.

20 Хайловский В.Н., Игенбеков Ш.И. Поисково-оценочные работы на медь в северной части Джезказганской синклинали за 1981–1986 гг.: отчет // Джезказган: Джезказганская ГРЭ, 1986. – [укажи количество страниц, если известно]. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках // М.: Недра, 1994. – 207 с.

21 Хохлов И.В. Безопасная разработка месторождений полезных ископаемых под водоемами // М.: Недра, 1971.

22 Стратегический план по руднику Жомарт // ПО «Жезказганцветмет». – 2011. – С. 130.

23 Вскрытие, подготовка и отработка запасов I очереди месторождения Жаман-Айбат / ГПИ. – 2008. – С. 137.

24 Проект отработки панелей 1, 2, 3, 39 юг залежи 4-I / ГПИ – 2006. – Загл. лист Ж 405422.

25 Жараспаев М.А. Опыт применения панельно-столбовой системы разработки на месторождении Жаман-Айбат // Интерактивная наука. – 2017. – №11. – С. 122–126.

26 Технология сейсморазведки. Специализированный выпуск научно-технического журнала ЕАГО «Геофизика». – М., 2002. – №1. – 152 с.

27 Романов В.В. Инженерная сейсморазведка. – 2015. – 393 с.

28 Istekova S., Makarov A., et al. Determining the Boundaries of Overlying Strata Collapse Above Mined-Out Panels of Zhomart Mine Using Seismic Data // Geosciences. – 2024. – Vol. 14, 310. <https://doi.org/10.3390/geosciences14110310>

29 Потапов О.А. (ред.) Интерпретация данных сейсморазведки: справочник // М.: Недра, 1990.

30 Макаров А.Б., Мосякин Д.В., Карпиков А.А. Оценка природного напряженного состояния массива на руднике Жаман-Айбат // Горный журнал. – 2005. – № 9–10.

31 Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., и др. Прочность и деформируемость горных пород // Л.: Недра, 1979.

32 Горный институт УрО РАН. Измерения напряженно-деформированного состояния горного массива на месторождении Жаман-Айбат: отчет. – Пермь, 2013. – 106 с.

33 Истекова С.А., Сиражев А.Н. Трехмерная сейсморазведка для моделирования рудных залежей в сложных горно-геологических условиях Казахстана: монография // Алматы: КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, 2022. – 340 с.

34 Юн А.Б. Разработка и обоснование параметров горнотехнической системы комплексного освоения Жезказганского месторождения: автореф. докт. дис. – 2016. Бондарев В.И. Сейсморазведка: учебник для вузов // Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 690 с.

Инструкции, методические руководства:

35 Гамалей Б.М. и др. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при разведке. - М., ВСЕГИНГЕО, 1975.

36 Инструкция «Правила безопасности при геологоразведочных работах». 1978г.

37 Инструкция о требованиях к материалам по сопоставлению результатов разведки и разработки месторождений твердых полезных ископаемых. - ГКЗ РК, г.Кокшетау, 2006.

38 Инструкция по сейсморазведке. Москва, 2000г.

39 ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. Госкомитет СССР по стандартам. М.

40 ГОСТ 21153.3-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. Госкомитет СССР по стандартам. М.

41 ГОСТ 28985-91. Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. Комитет стандартизации и метрологии СССР. М.

42 Временная инструкция по расчёту целиков при камерно-столбовой системе разработки с барьерными целиками для пологопадающих и наклонных залежей Джезказганского месторождения, ИГД АН (глубина 200-400м) Институт горного дела им. Кунаева, Алматы, 1984г.

43 Рекомендации для проектирования выработок в поле рудника Жомарт 2. ТОО Корпорация «Казахмыс» 2018г.