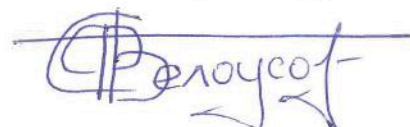


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



БЕЛОУСОВ ФЕДОР СЕРГЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА НАРУШЕННОСТИ
ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ
КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность: 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
А.П. Аверин

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ПО ТЕМЕ.....	9
ДИССЕРТАЦИИ	9
1.1. Анализ геофизических методов для изучения шахтных полей.....	9
1.2. Основные особенности геологических нарушений массива горных пород переходной зоны.....	18
1.3. Особенности технологии ведения горных работ в условиях исследуемого рудника	25
1.4. Анализ сейсмологических условий горного массива.....	26
1.5. Анализ геофизических шахтных методов	28
1.6. Выводы и постановка задач исследований.....	39
2. МЕТОДИЧЕСКОЕ, ТЕХНИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА	41
2.1. Теоретические основы проведения геофизических исследований.....	41
2.1.1. Ультразвуковой каротаж	41
2.1.2. Метод сейсмического просвечивания.....	43
2.2. Техническое обеспечение геофизических исследований	46
2.2.1. Шахтная беспроводная сейсмостанция	46
2.2.2. Ультразвуковой сейсмоскоп УК-2010	51
2.3. Выводы	52
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАРОТАЖА И ИНКЛИНОМЕТРИИ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ	54
3.1. Методика проведения измерений в шахтных условиях.....	54
3.2. Методика обработки данных по результатам наблюдений	60
3.3. Результаты исследований.....	66
3.3.1. Анализ и обработка данных метода сейсмического просвечивания.....	66
3.3.1.1. Основные результаты метода сейсмического просвечивания	73

3.3.2. Анализ и обработка данных метода ультразвукового каротажа.....	74
3.3.2.1. Основные результаты метода ультразвукового каротажа	77
3.3.2.2. Анализ и обработка полученных данных инклинометрических исследований	77
3.3.2.3. Основные результаты инклинометрических исследований	101
3.3.2.4. Результаты комплексного использования геофизических и инклинометрических исследований.....	104
3.3.2.5. Анализ полученных результатов.....	106
3.4. Выводы	108
Заключение	109
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	112

ВВЕДЕНИЕ

Россия занимает одно из ведущих мест в мире по добыче полезных ископаемых. Развитие подземной добычи на рудниках осуществляется за счёт использования современной техники и оборудования, которые позволяют увеличивать объёмы добычи и глубину разработки месторождений. С увеличением глубины разработки приходится сталкиваться с различными негативными факторами, которые влекут за собой усложнение условий горных работ. Реализуемая сегодня геотехнологическая концепция подземной разработки запасов кимберлитовых месторождений под глубокими карьерами основана на традиционной схеме нисходящей выемки запасов полезных ископаемых горизонтальными слоями с твердеющей закладкой. В силу известных особенностей при формировании закладочного массива образуется зона недозаклада и происходит неизбежная усадка твердеющей смеси, ввиду этого по мере увеличения толщины искусственного массива под переходной зоной возрастает и её интегральная податливость. В связи с этим на предприятиях наряду с дополнительным контролем и устранением последствий образования зон недозаклада возникает очевидная необходимость проведения оперативного контроля свойств рудного массива над закладываемыми выработками как необходимого условия предотвращения опасности нарушения переходной зоны. Примером этого может служить рудник «МИР» (АК «АЛРОСА»), расположенный в Республике Саха (Якутия), где на контакте трёх типов пород (кимберлитов, долеритов и доломитов) через образовавшийся проран произошёл прорыв воды, что привело к затоплению рабочих горизонтов подземного рудника и техногенной катастрофе. Решение данной проблемы актуально не только для кимберлитовых, но и для всех случаев отработки подземных запасов месторождений при использовании комбинированного способа их разработки.

Таким образом, обоснование и разработка методики мониторинга геомеханического состояния переходной зоны под дном карьера является

актуальной научной задачей, имеющей существенное значение для безопасного ведения горных работ.

Диссертация посвящена решению задачи контроля гидрогеологически неустойчивого состояния переходной зоны под дном карьера кимберлитовых месторождений, возникающего ввиду крайне сложных природно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий.

Объект исследования – горные породы переходной зоны под дном карьера при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений.

Предмет исследования – свойства горных пород и нарушенность переходной зоны при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений.

Цель работы заключается в обосновании методики мониторинга свойств горных пород переходной зоны под дном карьера при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений и оценки её нарушенности.

Идея работы заключается в комплексном использовании методов сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии для анализа динамики развития геомеханических процессов в переходной зоне при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений и оценки её нарушенности в ходе ведения горных работ.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать закономерности изменения скоростей продольных и поперечных волн и построить карты распределения данных величин для переходной зоны методом сейсмического просвечивания, выполнить оценку вертикального строения и нарушенности кимберлитов методом ультразвукового каротажа, величины деформаций подрабатываемого массива кимберлитов и характер их развития инклинометрическим методом.
2. Установить характер распределения динамического модуля упругости с фиксацией изменений упругих свойств горных пород переходной зоны.
3. Обосновать характеристики и создать опытный образец беспроводной сейсмической аппаратуры со шпуровыми зондами для просвечивания массива

горных пород переходной зоны между оконтуривающими выработками и оценки его упругих свойств с целью повышения эффективности геомеханического мониторинга.

4. Разработать методику геомеханического мониторинга нарушенности переходной зоны под дном карьера на основе комплексного анализа данных сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии.

Научные результаты работы

1. Обоснована методика мониторинга нарушенности переходных зон под дном карьера на основе комплексного анализа данных сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии, позволяющая эффективно выделять контуры аномальных областей и учитывать изменения параметров нарушенности горных пород.

2. Впервые установлена корреляционная зависимость, связывающая скорости продольных волн и величину оседания реперов инклинометрических скважин в кимберлитовом массиве под дном карьера в переходной зоне.

3. Установлены критерии для определения областей разуплотнения кимберлитового массива под дном карьера по величинам скорости продольных волн и значениям оседания реперов инклинометрических скважин.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение сейсмотомографического метода, с использованием разработанной беспроводной сейсмостанции, позволяет оперативно устанавливать пространственно-временные изменения упругих характеристик кимберлитов под дном карьера.

2. Разработанная методика мониторинга нарушенности переходных зон под дном карьера, включающая сейсмическое просвечивание, ультразвуковой каротаж и инклинометрию скважин, позволила установить критические значения скоростей упругих волн и оседаний реперов, определяющие переход этих областей в разрушенное состояние.

3. За трехлетний период наблюдений экспериментально установлена взаимосвязь увеличения размеров области разрушения в переходной зоне под дном

карьера и соответствующее снижение в ней средней скорости упругих волн и динамического модуля упругости соответственно, на 10% и 16%.

Теоретическая значимость выполненных исследований заключается в обосновании возможности использования сейсмических волн в переходной зоне для определения его локального геомеханического состояния.

Практическая значимость работы состоит:

– в создании работоспособной методики мониторинга нарушенности переходных зон на основе комплексного анализа данных сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии, позволяющей эффективно определять его геомеханическое состояние, а также выявлять зоны потенциальной неустойчивости;

– в установлении критериев областей нарушенности переходной зоны под дном карьера с использованием карт распределения информативных параметров сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии;

– в создании эффективной беспроводной искробезопасной сейсмической аппаратуры, обеспечивающей оперативное выполнение сейсмического просвечивания с произвольным шагом расстановки сейсмоприёмников, в шахтах и рудниках, опасных по содержанию газа и пыли в рудничной атмосфере.

Методы исследований. Общей теоретической и методологической основой диссертации является комплексный подход, включающий использование геофизических и инклинометрических методов. В качестве основных методов исследований использовались: анализ литературных данных, анализ натуральных экспериментальных измерений, проведение сейсмического просвечивания, проведение ультразвукового каротажа, проведение инклинометрии горизонтальных скважин, системный анализ, преобразования, масштабирование и фильтрация информации, методы статистической обработки результатов натуральных наблюдений.

Достоверность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается их сходимостью с результатами исследований рудного массива при проведении буровых работ, выполненных в соответствии с полученными

картами распределения скоростей продольных волн, а также применением апробированных методик, средств и аппаратуры при проведении производственных экспериментальных исследований.

Личный вклад автора состоит в обосновании новой методики мониторинга геомеханических процессов в переходной зоне под дном карьера, проведении научно-исследовательских и опытно-промышленных полевых работ, обработке полученных данных, комплексном анализе и оформлении результатов исследований, прямом участии в разработке научно-исследовательской аппаратуры и её практическом применении.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях 10, 11 и 13-й Международной научной школы молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2013, 2014, 2015), Международной конференции и симпозиуме «Неделя горняка» (2015 г.), Международной научной школе (конференции) академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (2016 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликованы 11 печатных работ, в том числе 4 в журналах из перечня, установленного ВАК при Минобрнауки РФ, рецензируемых научных изданиях.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 106 наименований, изложена на 121 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 44 таблицы.

1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.1. Анализ геофизических методов для изучения шахтных полей

Особенностью геофизических методов является зависимость измеряемых в массиве магнитных, электрических и гравитационных и полей, а также акустических, радиационных и тепловых электромагнитных излучений и их свойств. Т.е. оценить изменения напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств кимберлитового массива переходной зоны становится возможным по геомеханическому мониторингу параметров вышеупомянутых полей и излучений.

Среди ученых, внёсших значительный вклад в решение проблем нарушенности переходных зон, можно отметить А.П. Аверина, Н.Я. Азарова, Л.М. Альпина, А.В. Анциферова, М.С. Анциферова, И.И. Айнбиндера, В.И. Баранова, В.Д. Барышникова, А.А. Баряха, В.А. Бобина, Д.М. Бронникова, А.С. Вознесенского, Ю.П. Галченко, Г.А. Гамбурцева, А.А. Глухова, В.Н. Дахнова, А.И. Заборовского, Н.Ф. Замесова, В.Н. Захарова, М.А. Иофиса, Ю.С. Исаева, А.Н. Краева, Н.П. Крамскова, С.В. Кузнецова, М.В. Курленю, П.П. Лазарева, А.А. Логачева, В.В. Макарова, И.В. Милетенко, А.А. Михайлова, П.П. Никифорова, В.Н. Одинцева, В.Н. Опарина, А.А. Петровского, И.Ю. Рассказова, Ю.В. Ризниченко, А.Д. Рубана, Л.А. Рябинкина, Е.Ф. Саваренского, И.А. Санфирова, А.Д. Сашурина, А.С. Семенова, Л.В. Сорокина, А.Г. Тархова, М.Г. Тиркеля, В.А. Трофимова, В.В. Федынского, В.Л. Шкуратника, О.Ю. Шмидта, О.П. Якобашвили, Д.В. Яковлева, Б.М. Яновского.

При добыче полезных ископаемых подземным способом доводится встречаться со многими весьма опасными факторами, такими как пылегазовые условия в выработках, обрушения кровли, выбросы, горные удары и другие. С середины XX века геофизическими методами ведутся исследования для прогнозирования данных опасных ситуаций.

Среди основных преимуществ геофизических методов следует выделить способность оценить пространственные характеристики строения и нарушенного состояния кимберлитового массива, а также способность контролировать объём массива различного размерного уровня.

Среди большого множества геофизических методов [1-4] можно выделить тензометрический [5-10], электрометрический [11-17], сейсмический, электромагнитный [18-21], радиоволновой [22-25] и тепловой, как наиболее распространённые и имеющие значительную научную базу. Эти методы основаны на регистрации всех геофизических полей. Главное значение отводится электромагнитному, сейсмоволновому, акустическому, радиационному и тепловому методам. Подземные методы геофизики могут быть скважинными и шахтными. Значительным недостатком скважинных методов является обязательное проведение буровых работ, что негативно влияет на сохранность исследуемого массива. Рассмотрим более подробно некоторые из них.

Скважинная геофизика является совокупностью геофизических методов, которые применяются для изучения массивов горных пород (кимберлитов) в околоскважинном и межскважинном пространстве по схемам скважина – скважина, скважина – дневная поверхность, скважина – шахта. Её основная цель заключается в поиске и разведке новых месторождений, а также решении инженерно-геологических задач. Околоскважинные исследования заключаются в проведении измерений параметров возбуждённого поля в одной скважине, в которую помещают источник физического поля и приёмник, расположенный на некотором удалении от него. Для межскважинных исследований в одну скважину помещают приёмник и измеряют параметры поля источника, который находится в соседней скважине или на поверхности.

Основными методами скважинной геофизики в зависимости от применяемых физических полей являются электроразведка, сейсморазведка, магниторазведка, геомеханические методы и др. На рисунке 1 представлен пример метода скважинной геофизики.

К скважинной электроразведке относятся радиоволновое просвечивание, метод заряженного тела, метод электрической корреляции, дипольное электромагнитное профилирование скважин и др.

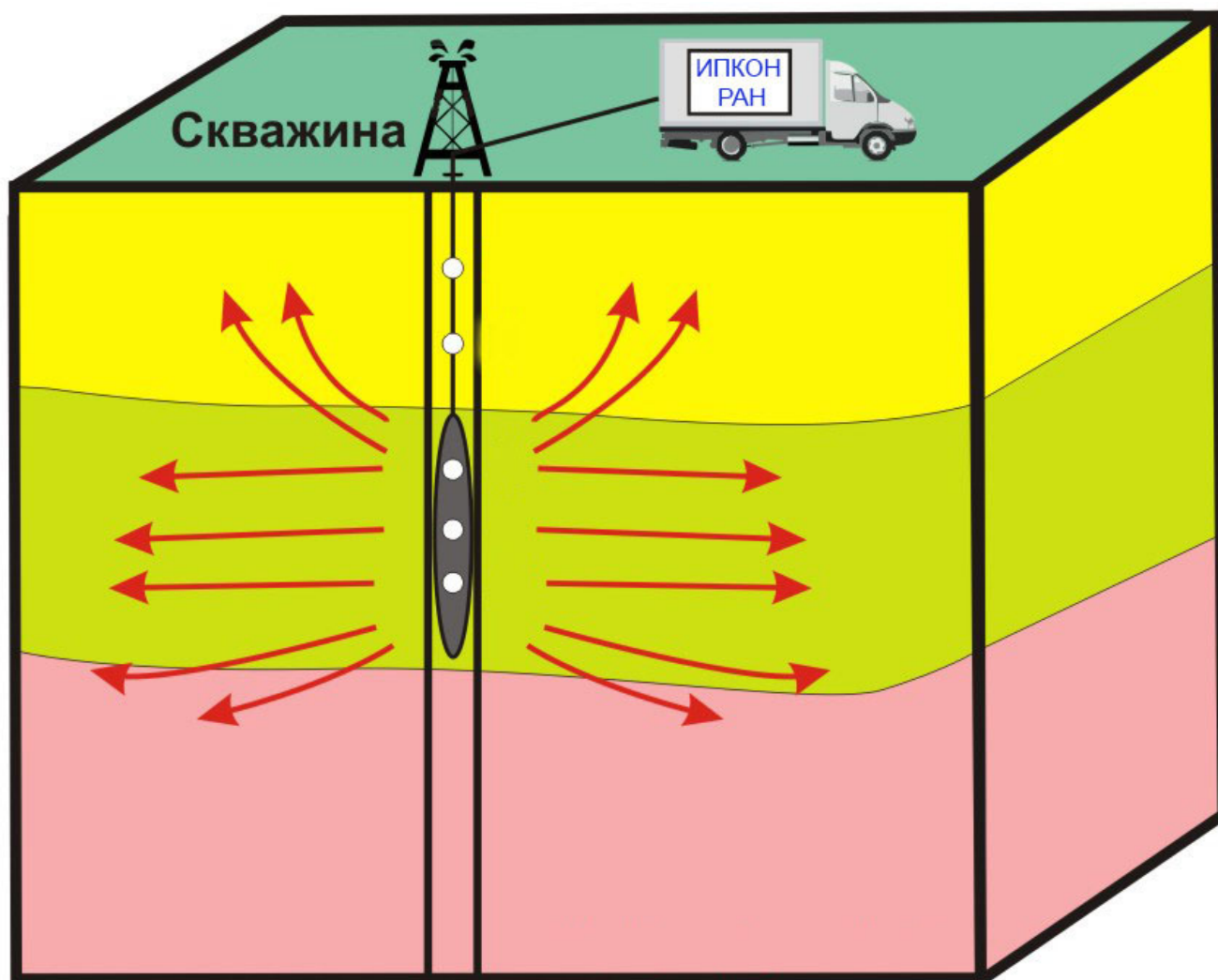


Рисунок 1. Пример проведения исследований методом скважинной геофизики

Скважинная сейморазведка включает межскважинное акустическое прозвучивание и вертикальное сейсмическое профилирование. При межскважинном акустическом прозвучивании происходит возбуждение упругих колебаний в одной скважине и приём их в другой, её предназначение заключается в изучении физико-механических свойств горных пород в межскважинном пространстве. Вертикальное сейсмическое профилирование применяется для

выделения геологических границ горных пород в околоскважинном и межскважинном пространстве.

Скважинная магниторазведка заключается в измерении вектора напряженности магнитного поля и его компонент внутри скважины. Её применяют для поисков в околоскважинном пространстве геологических объектов с высокой остаточной намагниченностью.

Скважинные геомеханические методы изучают ореолы рассеяния, зоны с повышенным содержанием искомым химических элементов возле рудного тела с использованием электрических и ядерно-геофизических методов.

В шахтной геофизике, в отличие от скважинных геомеханических методов, профили геофизических наблюдений нацеливаются по направлению протяжения полезного ископаемого. В данном случае профилями наблюдений являются подготовительные горные выработки, из которых добываются полезные ископаемые. Измерения могут выполняться веерной томографической сеткой с использованием сейсмоакустических и электромагнитных (включая радиоволновые) полей.

Основной задачей шахтной геофизики является изучение горно-геологических условий для отработки рудного массива и прогноз геологических нарушений данного массива, существенно влияющих на эффективность и безопасность ведения горных работ. Это касается прежде всего геологических нарушений, не выявляемых традиционными геологическими методами или нуждающихся в получении дополнительной информации о них. В свете вышеизложенного раскрывается первая особенность или геологическая причина необходимости использования шахтной геофизики.

Вторая особенность шахтной геофизики заключается в том, что используемые при ее применении геофизические методы имеют много общего с методами полевыми [26], но также есть существенные отличия, связанные с условиями проведения натурных наблюдений. В наземной геофизике изучаются поля из «нижнего полупространства», а в подземной исследуется объемная модель.

Особые требования предъявляются к шахтной геофизической аппаратуре, которая должна быть выполнена в искро- и взрывобезопасном исполнении и допускается к использованию в шахтных условиях только по разрешению специализированных организаций [27].

Всё это выделяет шахтную геофизику в самостоятельное направление, требующее разработки специальной методологии, сбора и интерпретации результатов [28].

Основными особенностями шахтной геофизики являются область применения геофизических методов, задачи и условия проведения исследований. К области применения шахтной геофизики относятся все месторождения, где ведётся добыча полезных ископаемых подземным способом. Вопросы о трассировке геологических нарушений внутри массива горных пород (выемочного столба впереди забоя) всегда остаются открытыми. Всё это обусловило необходимость разработки и применения методов шахтной геофизики.

Методы шахтной геофизики применяются для решения различных геологических задач при исследовании свойств породного массива и являются комплексом методов таких, как акустический (сейсмоакустический, ультразвуковой), электрометрический, эмиссионный (акустическая эмиссия). Вышеуказанные методы имеют различные модификации и позволяют решать широкий круг задач, относящихся к горному производству. К особо важным задачам можно отнести оценку горно-геологических условий очистных и проходческих работ, прогнозирование зон (областей) трещиноватости, а также разломов и закарстованных зон, с возможной оценкой фильтрационных свойств горных пород.

Электроразведка для исследований использует электромагнитные поля различной природы. Методы электроразведки позволяют исследовать параметры геологического разреза, измеряя параметры постоянного тока или электромагнитного поля. Примером электроразведки может служить исследование методом вызванной поляризации.

На погрешность измерений электрометрических методов влияют различные факторы, к основным из которых можно отнести:

- влажность пород в зонах исследований;
- наличие металлической арматуры (крепь, трубопроводы, железобетонные конструкции) в зонах исследований;
- вид заполнителя трещин порового пространства пород и степень минерализации;
- внешние электрические поля;
- контакт с массивом горных пород питающих и измерительных электродов при измерении сопротивлений.

Если отсутствуют эти факторы, то погрешность метода будет составлять 20–30% [29–37]. При столь высоких значениях погрешности возникает вопрос о целесообразности применения электроразведки в шахте.

Ультразвуковые методы позволяют определять свойства кимберлитов и их нарушенное состояние как в массиве, так и на образцах. Принцип работы ультразвукового оборудования основан на приёме и анализе акустических колебаний, приходящих от источников сигнала, в диапазоне частот свыше 15 кГц. К основным параметрам ультразвуковых методов относятся скорости упругих волн (V_p и V_s), частотный состав принимаемых колебаний и коэффициент затухания. Скорости продольных и поперечных волн в основном используются для определения трещиноватости и напряжений горных пород, коэффициент затухания для этих целей практически не применяется [38]. Количественные показатели напряженно-деформированного состояния и трещиноватости массива горных пород измеряются по средствам специализированной аппаратуры, полученные результаты сравнивают с тарировочными зависимостями для схожих пород. К основным разновидностям ультразвукового метода можно отнести ультразвуковой каротаж, прозвучивание между измерительными скважинами и продольное профилирование вдоль бортов выработок. Ввиду особенности распространения ультразвуковых колебаний (затухание, малая база просвечивания) область исследования свойств кимберлитов находится в интервале 1-2 м.

По результатам анализа известных исследований [39–48] доказано, что при увеличении давления происходит возрастание скоростей упругих волн в массиве горных пород, при этом максимальное значение частотного спектра переходит в высокочастотную область, также фиксируется уменьшение значения затухания. В случае одноосного сжатия образца горной породы в направлении, параллельном сдавливанию, фиксируется значительное изменение V_p , но при этом в перпендикулярном направлении изменений нет. В зависимости от типов пород при одинаковых давлениях значения скоростей волн могут измениться до 40%, при этом наблюдается меньший прирост скорости у более крепких пород [44].

Особенностью коэффициента затухания является его сильная чувствительность на изменения физико-механических свойств кимберлитов, а также напряженно-деформированного состояния массива, ввиду прямой зависимости от минерального состава, трещиноватости и пористости. Тем временем как коэффициент затухания падает до эффекта разрушения при увеличении давления, происходит возрастание скорости, но до нагрузок около 50-70%.

Как показывают результаты лабораторных исследований при сжатии образцов горных пород значение коэффициента затухания уменьшается в 2-6 раз относительно ненагруженного состояния, при этом в интервале давления 40-50 МПа фиксируется его максимальное уменьшение [39].

При росте трещиноватости и пористости горных пород наблюдается противоположный эффект, влияющий на параметры акустических ультразвуковых колебаний. Значительные научные исследования по данному направлению проводились в местах нарушений туннелей и выработок на основе определения свойств горных пород их слагающих [39, 43, 49, 50].

Исходя из вышеизложенного ультразвуковые методы получили широкое распространения для определения физико-механических свойств горных пород, напряженно-деформированного состояния массива, скважинных исследований и др. К основным выводам по ним можно отнести:

- основной метод для лабораторного определения физико-механических свойств горных пород;
- модификации сейсмических и электрометрических методов позволяют получить предварительную информацию о физико-механических свойствах горных пород и нарушенном состоянии массива в отдельных его областях;
- высокая точность определения скоростей продольных и поперечных волн;
- достоверное определение коэффициента затухания;
- возможность анализа принимаемых колебаний в массиве горных пород по частотному составу;
- невозможность использования для больших площадей массива горных пород, ввиду малой области измерений (<2 м);
- сложность проведения исследований методом междускважинного прозвучивания в глубину массива горных пород при значительном увеличении расстояния от борта выработки.

Сейсмические методы исследования получили самое большое распространение среди всех геофизических методов для определения нарушенности и напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Данные методы позволяют достоверно определить акустические параметры горных пород: скорости упругих волн, коэффициент затухания, частотное отношение фиксируемых колебаний и др. Главной особенностью сейсмических методов в сравнении с вышеупомянутыми является высокая разрешающая способность и независимость получаемой информации от влияния влажности и электрических наводок.

К основным применяемым модификациям сейсмических исследований для шахтных условий можно отнести методы сейсмического просвечивания, преломленных волн и отраженных волн. Метод преломленных волн (МПВ) в сложных геологических условиях при исследовании тонкослоистых толщ показан низкую эффективность. Также при изучении состояния водозащитной толщи в шахтных условиях установлено, что упругие волны движутся от крепких горных пород к менее крепким. Метод отраженных волн (МОВ) показал свою эффективность для данных условий, он позволяет определить границу раздела

сред, но при этом не дает возможность определить характер горных пород, слагающих слой. Для данных исследований наиболее применим метод сейсмического просвечивания (МСП), также отличающийся своей простотой и высокой производительностью за счёт изучения исключительно амплитуд первых вступлений и времен распространения скоростей упругих волн от источника к приёмнику.

В наши дни сейсмические методы исследований получили широкое распространение на крупнейших горнодобывающих предприятиях, где основной областью их применения является оценка нарушенного состояния массива и физико-механических свойств горных пород его слагающих. При разработках месторождений открытым и подземным способом применяются различные вариации сейсмических методов позволяющих исследовать большой круг задач по определению параметров и типов нарушенного состояния массива горных пород.

В наши дни многие научно-исследовательские учреждения перешли на сейсмические методы неразрушающего контроля, что способствовало решению многих проблем возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых [51]. Параллельно развитию научной базы идет создание новейшей многофункциональной регистрирующей аппаратуры [52, 53]. Проводятся значительные теоретические исследования, позволяющие получить важную информацию о механизмах распространения, регистрации, обработке и возбуждения сейсмических волновых полей. Несмотря на это рано говорить об истощении возможностей сейсмических методов, ввиду большого объёма неизученных вопросов возникающих при процессах формирования волнового поля и его взаимодействия с массивом горных пород, а также трудно анализируемого большого потока информации о нарушенном состоянии массива и физико-механических свойствах горных пород его слагающих.

На распространение упругих волн оказывают сильно влияние горно-геологические условия расположение рудного массива и вмещающих горных пород. При регистрации волнового поля обычно получают несколько типов волн, которые могут быть как различной природы, так и поляризации, а также они могут

перекрываться в частотной и временной области. Требуются не малые трудозатраты при проведении физического и математического моделирования для правильного понимания природы волновых полей, разработки критериев оценки, прогноза параметров и типов нарушенности массива, не считая дальнейшую экспериментальную оценку получаемых данных [54]. Методы математического моделирования в наши дни являются важным инструментом для теоретических исследований. При физическом моделировании приходится сталкиваться с рядом сложных задач, которые не дают прямых ответов на следующие вопросы: подбор схожих пород, продвижение волновых колебаний, возбуждение сигналов, решение задач ограниченных размеров физических моделей (в реальной картине геологическая среда бесконечна), соблюдение условий теорем подобия.

1.2. Основные особенности геологических нарушений массива горных пород переходной зоны

Одними из важнейших предметов исследования и прогноза в шахтной геофизике являются геологические нарушения массива горных пород, под ними имеют в виду изменения строения и мощности, а также результаты различных геологических процессов, которые способны существенно повлиять на ведение добычных работ.

Как показывает практика, в каждом выемочном столбе получают развитие не менее двух типов осложнений. Это вполне закономерно, поскольку проявляется характерная в природе взаимосвязь явлений, влекущая за собой, соответственно, комплекс осложнений при добыче. Например, дизъюнктивные нарушения сопровождаются областью повышенной трещиноватости пород. Следовательно, технологической службе шахты необходимо решать вопросы, не только связанные с переходимостью дизъюнктива, но и с устойчивостью кровли. А если это нарушение распространено в зоне подработки водоносного горизонта, то появляется третья задача, связанная с опасностью прорыва подземных вод в выработанное пространство. Таким образом, выделяется имеющая важное

значение в развитии подземной добычи полезного ископаемого категория геологических осложнений, обусловленных совокупностью геологических факторов.

Как показывает практика подземной разработки месторождений, для повышения эффективности технологии добычи полезных ископаемых необходимо достоверное геомеханическое обоснование мониторинга нарушенности кровли камер, переходных зон и выработок, которое основывается на исследованиях физико-механических свойств горных пород, геолого-тектоническом строении месторождения, первичных напряжениях и законах их распределений в конструктивных элементах систем разработки. Определив параметры напряженно-деформированного состояния породного массива и его физико-механические свойства, можно производить количественное прогнозирование геомеханических процессов в переходной зоне при комбинированном ведении горных работ на кимберлитовых месторождениях.

В момент достижения предельного значения напряженно-деформированного состояния кимберлитового массива переходной зоны приходится сталкиваться с негативными факторами, снижающими безопасность ведения горных работ, проявляющимися в виде образования трещин в кровле или стенках выработок, прорывов воды, частичного или полного их обрушения, раздавливания переходных зон, рудных массивов, поломки крепи выработок и прочего.

Одной из весомых проблем при комбинированной системе разработки месторождений является прорыв подземных вод в горные выработки. Внезапный прорыв подземных вод в горные выработки является одним из видов существенных горно-геологических осложнений эксплуатации шахт, значительно снижающим эффективность и безопасность очистных работ. Прорывами вод принято считать увеличение их дебита в 3–5 и более раз, возникшее при подработке водоносных горизонтов. Приурочены они, как правило, к областям повышенной трещиноватости породного массива, которая в процессе очистных работ активизируется, усиливается и служит водопроводящими путями.

Известные гидрогеологические методы ограничиваются, как правило, прогнозами водопритоков и определением вероятности прорывов воды в выработки, но не указывают конкретные места этих прорывов. Однако именно последнее обуславливает внезапность и, соответственно, опасность прорывов подземных вод в выработанное пространство и осложнения при добыче, что обосновывает первоочередную необходимость в их опережающем прогнозе. Решение этой задачи методами шахтной геофизики заключается в выявлении отклонений от нормального распределения физических полей в массиве горных пород и картировании участков, благоприятных для прорывов воды в горные выработки. Последние приурочены к областям повышенной трещиноватости пород, они становятся основным объектом поиска и прогноза.

Вопрос о напряженно-деформированном состоянии кимберлитового массива переходной зоны создаёт много противоречий, что не позволяет прийти к единому мнению о нём. Принятая модель массива горных пород является основой всех гипотез и теорий, позволяя за счёт применения разнообразного математического аппарата определять его напряженное состояние.

Гипотеза А.Н. Динника получила широкое распространение в вопросе о напряженно-деформированном состоянии породного массива. В соответствии с его гипотезой горная порода представляет собой сплошное изотропное твердое тело, которое находится в упругом состоянии. На основании теории упругости напряжения, возникающие в нем, возбуждаются и распределяются за счёт действия гравитационных сил. Вследствие этого горизонтальные напряжения равны между собой и определяются через коэффициент Пуассона, а вертикальные имеют максимальные значения. В силу вышесказанного напряженно-деформированное состояние породного массива зависит от их веса и подвержено только сжимающим напряжениям

На нарушенность переходных зон и породных обнажений влияют разнообразные факторы, которые в дальнейшем могут привести к опасным ситуациям и техногенным катастрофам, ввиду чего они требуют периодического мониторинга и составления прогнозов. Под устойчивостью переходных зон и

обнажений пород в выработках подразумевается пребывание их в спокойном состоянии, без значимых разрушений в течение всего срока службы месторождения, во многом зависящее от технологии горных работ или конструкции системы разработки.

Нарушенность зависит от множества факторов, которые можно разделить на три основные группы: геомеханические, горно-геологические и технологические. Геомеханические факторы включают физико-механические свойства горных пород, структурную неоднородность, нарушенность массива трещинами, условия на контакте руды с вмещающими породами и начальное напряжённо-деформированное состояние кимберлитового массива. К горно-геологическим факторам относятся морфологические параметры рудного тела, а именно мощность, угол падения, длина по простиранию. Технологические факторы состоят из глубины горных работ, формы и размеров несущих конструктивных элементов системы разработки, пространственной ориентации, конструктивно-технологических особенностей системы, которые определяют условия работы её несущих элементов под нагрузкой и включают в себя временные переходные зоны в выработанном пространстве, закладочный материал или крепи, ослабленные горными выработками переходные зоны, необходимое время сохранения их устойчивости, влияние, оказываемое взрывными работами, и прочее.

Роль переходных зон может быть различной в части обеспечения безопасных условий производственных работ. При комбинированных системах разработки оставляются временные переходные зоны, которые извлекаются после выемки камерных запасов или в случаях ненужности сохранения вышерасположенных выработок. Запас прочности таких переходных зон рассчитывается с учетом необходимого времени для обеспечения их устойчивости с момента оформления до погашения. В случае камерно-столбовых систем разработки междукамерные переходные зоны оставляются на длительный срок или навсегда. Переходные зоны обладают запасом прочности, отвечающим высоким технологическим требованиям по обеспечению устойчивости.

Во многом на устойчивость обнаженных пород оказывают влияние те же факторы, что и на переходные зоны, но при этом приходится сталкиваться с некоторыми особенностями. Устойчивость кровли сильно зависит от формы поверхности обнажения (плоская, куполообразная), а также размера поперечного пролёта обнажения.

Геологические и общую часть технологических факторов, при всём их разнообразии и изменчивости, можно достаточно просто количественно оценить, также не представляет особого труда их учёт при определении размеров переходных зон и камер. Для определения допустимых размеров переходных зон и камер необходимо учитывать сведения о геологических и технологических факторах, которые могут быть взяты из проектов горных работ или от геологической и горнотехнической служб действующих предприятий. При этом приходится сталкиваться с различными трудностями, к которым можно отнести определение количественной оценки геомеханических факторов, учёт взаимного влияния выработанных пространств, а также развитие процессов сдвижения и формирования зон опорного давления.

Для определения физико-механических свойств пород требуются постановки специальных исследований (испытаний). С точки зрения задачи установления прочных размеров камер и переходных зон данные исследования должны обеспечивать получение усредненных значений прочностных и упругих характеристик для основных типов пород. К таким характеристикам можно отнести пределы прочности на сжатие, растяжение и срез, модуль упругости, коэффициент Пуассона, а также объемный вес и угол внутреннего трения. Важную роль играет отбор проб пород с достаточной представительностью, а также получение в ходе испытаний коэффициента вариации значений физико-механических характеристик, находящегося в пределах, обеспечивающих достаточную точность определения их средней величины. Итогом результатов исследований должно быть получение отклонения минимальных значений характеристик от средних. Данные действия выполняются с целью последующего

учёта неоднородности массива пород при получении коэффициента запаса прочности, который в дальнейшем используется в расчётах.

Строение массива горных пород переходной зоны на разных его участках зависит от типа и условий образования пород. По характеру строения он может рассматриваться либо как однородная среда, либо как слоистая среда с выраженными напластованиями пород. Участки осадочного происхождения относятся к первой качественной разновидности массива, для пород изверженных и метаморфических ко второй.

Понятие однородности пород носит весьма условный характер. Такие геологические процессы, как метаморфизм и метасоматоз, на фоне разнообразного проявления трещиноватости оказывают непосредственное влияние на закономерное изменение свойств изверженных и метаморфических пород в силу их генетических особенностей.

Всё вышесказанное указывает на сложный характер распределения структурных элементов, которые имеют большое разнообразие их количественных и качественных характеристик, и требует определения размеров переходных зон и устойчивости пролётов выработок с обязательным ориентированием на усредненные показатели.

По большому счёту, всем горным породам в той или иной степени свойственна трещиноватость. К менее трещиноватым можно отнести молодые породы осадочного происхождения, к значительно более трещиноватым – древние изверженные и метаморфические породы, представляющие собой среду блокового строения.

В соответствии с вышеизложенным для определения допустимых пролётов обнажения пород используются две упрощённые структурно-механические модели горного массива. Первая модель характеризуется слоистостью, а вторая – блоковым строением пород.

Оценку структурного ослабления массива горных пород выполняют на основе изучения его нарушенности трещинами с целью определения степени уменьшения прочности реального массива по отношению к установленной

прочности, полученной в ходе испытаний образцов пород [55, 56]. Данные исследования могут выполняться как путём сравнительных испытаний на прочность монолитных и трещиноватых образцов, так и путём измерений параметров трещиноватости в производственных условиях.

В любом случае непосредственные наблюдения и измерения в производственных условиях контакта руды с вмещающими породами имеют непосредственную цель, заключающуюся в определении степени нарушенности зоны контакта и её ослабления по отношению к окружающему массиву пород. Заключительным шагом данных исследований является получение величины сцепления пород на контакте.

Для оценки начального напряженного состояния переходной зоны на участке предстоящих работ в основном применяют два варианта. Первый заключается в использовании специальной аппаратуры или приспособлений, которые помещаются в скважины, и проведении непосредственных измерений величины напряжений, действующих в массиве. Второй вариант рассматривает использование теоретических представлений о напряженном состоянии горного массива на основе существующих гипотез о формировании в нём поля напряжений.

Также следует упомянуть о сложности и трудоёмкости непосредственных измерений напряжений и деформаций в массиве горных пород переходной зоны, для проведения которых необходимы использование специальной аппаратуры, привлечение к работе квалифицированных исполнителей, затраты времени на проведение данных исследований. Помимо этого, проведение таких работ возможно лишь на ограниченном числе предприятий. Основная часть предприятий и проектных институтов на сегодняшний день не обладают возможностью получения таких данных. Ввиду этого, как правило, работники производства и проектировщики предпочитают использовать в расчётах современные теоретические представления о формировании поля напряжений в массиве горных пород и их величине.

1.3. Особенности технологии ведения горных работ в условиях исследуемого рудника

Вскрытие месторождения осуществлялось двумя вертикально расположенными стволами скиповым (СС) и клетевым (КС). Каждый из стволов был пройден с поверхности до горизонта -615 м с диаметром 8 м. Разработка месторождения проводилась в соответствии с планом проектом института «Якутнипроалмаз».

Кимберлитовое тело на первом этапе вскрышных работ разделили на 4 эксплуатационных этажа (блока), каждый из которых мощностью 100 м, их вскрытие осуществлялось этажными квершлагами по основным горизонтам -210 м, -310 м, -410 м, -510 м и -615 м.

В процессе подземной отработки кимберлитов может находиться только один блок, начиная с верхнего $-210 / -310$ м и на углубление к нижележащим блокам, т.е. в нисходящем порядке, при этом верхний горизонт используется как вентиляционный, а нижний как откаточных.

Каждый из блоков разделяется по вертикали на выемочные единицы, к примеру запасы блока №1 разбиваются на 20 отрабатываемых слоёв мощностью по 5 м, каждый слой в свой очередь разбивается на три панели, каждая из которых состоит из 20-25 лент практически схожего размера.

В соответствии с проектом при средних сечениях $25,5 \text{ м}^2$ очистные ленты имеют высоту 5,0 м, а ширину 5,1 м. При средних сечениях $20-22 \text{ м}^2$ на разрезных слоях значения параметров уменьшаются до $4*5$ м. При средних сечениях лент $25-30 \text{ м}^2$ на основных слоях можно изменять высоту до 6–7 м, а ширину до 6 м. Форма сечения очистной выработки традиционная, для комбайнового способа проходки, и прямоугольная, с угловыми (замковыми) закруглениями в крайних угловых точках. Данная форма сечения ленты обеспечивает минимальные потери руды в ходе выемки запасов.

Объемная модель кимберлитового тела и подготовительных выработок показана на рисунке 2.

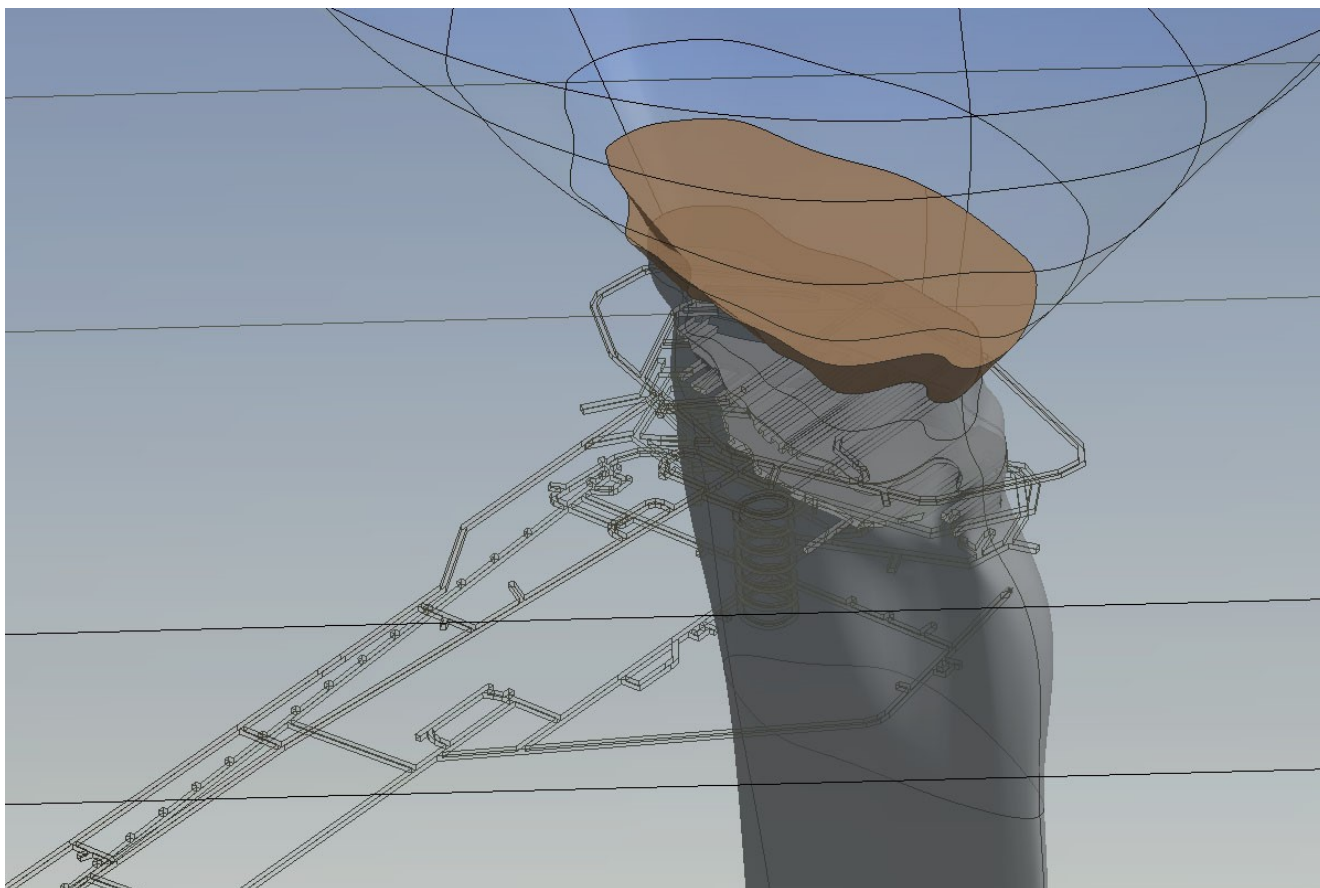


Рисунок 2. Расположение подготовительных выработок и рудного тела в объемной модели

Для каждого вскрываемого блока подготавливаются слоевые штреки, вентиляционные восстающие, спиральный съезд и т.д. Обязательным является проходка четырех панельных заездов для каждого слоевого штрека. Проходка панельных заездов на верхний слой осуществляется под углом 8 градусов, на нижний под углом -8 градусов, а на средний по горизонтали. Отработка слоя происходит по камерно-целиковой схеме со слабо наклонными тупиковыми лентами ($3-5^\circ$) с обязательным оставлением между лентами целика шириной не менее 2 лент.

1.4. Анализ сейсмологических условий горного массива

С областями повышенной трещиноватости пород связано уменьшение значений их плотности и, соответственно, акустической жесткости, изменение динамических и кинематических параметров сейсмических волн.

В целом теоретические исследования и лабораторные изучения распространения упругих волн в трещиноватых породах позволили установить следующие закономерности [57]: скорость распространения волн в трещиноватых породах уменьшается пропорционально увеличению количества трещин; с увеличением трещиноватости возрастает затухание упругих колебаний; трещиноватость, параллельная направлению распространения волн, на их затухание влияет меньше, чем трещиноватость перпендикулярная; трещиноватость пород на затухание волн влияет в значительно большей степени, чем на скорость их распространения; трещиноватость пород влияет в целом на динамические характеристики головных волн; трещиноватость горных пород смещает частоту максимума спектральной плотности влево.

Следовательно, аномальную трещиноватость пород, сопровождающую геологические нарушения вне зависимости от их типа, следует рассматривать как универсальный аномалиеобразующий фактор и в физических полях.

Различные виды геологических нарушений в зависимости от генезиса, характеризующих их параметров и интенсивности проявления имеют свои специфические особенности локальных изменений в геофизических полях.

Комплекс геофизических методов, используемых в шахтной геофизике. В подавляющем большинстве зарубежных добывающих стран (кроме стран СНГ) для геофизического прогноза геологических нарушений массива горных пород применяются методы только шахтной сейсморазведки. Очевидно, это можно объяснить рядом причин, в том числе: высокой разрешающей способностью сейсморазведки; отсутствием для ее применения пределов в системах отработки горного массива (допускается любая, а не только выемочными способами); возможностью прогнозирования из одиночной горной выработки, впереди забоя; значительно большей глубинностью опережающего прогноза; более высокой надежностью прогнозов и т.д.

Шахтные сейсморазведочные работы в основном проводят на методом сейсмического просвечивания, сейсмической локации впереди забоя и отраженных волн [57–60].

1.5. Анализ геофизических шахтных методов

Обоснование выбора метода сейсмического просвечивания. Шахтной сейсморазведкой называется раздел шахтной геофизики, занимающийся решением геологических задач путем изучения искусственно созданных полей упругих колебаний непосредственно в массиве горных пород. Для этого в одной выработке устанавливаются источники сейсмических колебаний, а в другой приёмники фиксирующих их.

Идея метода сейсмического просвечивания заключается в регистрации упругих колебаний распространяющихся от источников в области исследуемого рудного массива и сложном определении динамических и кинематических характеристик упругих волн различных типов и процессов их взаимодействия с аномальными объектами, связанными с геологическими нарушениями.

В шахтной сейсморазведке в зависимости от горно-геологических условий используются нижеперечисленные способы возбуждения сейсмического сигнала: удары темпером по металлической штанге; механические удары по забою шпура с помощью скважинного механического ударника (пружинного типа); механические удары кувалдой по обнажению борта в горной выработке; установление в шпуре зарядов ВВ, пробуренных на глубину до 2–2,5 м; взрыв одиночных или связок капсулей-детонаторов в шпурах.

Анализ, обработка и интерпретация данных сильно зависят от качества зарегистрированных сейсмограмм, для которого качество контакта геофона с породой является определяющим.

В зависимости от условий способы приёма следующие: при прочном контуре свежепройдённых горных выработок и крепких породах приём осуществляется сейсмоприёмниками, устанавливаемыми на обнажении рудного тела в этих

выработках, а при изучении пород кровли на её обнажении; при непрочном контуре горной выработки приём осуществляется сейсмоприёмниками, устанавливаемыми в шпурах за его зоной.

В любом случае наиболее благоприятными условиями возбуждения и приёма сейсмических волн являются точки в горных выработках за зоной неупругих деформаций, определяемой в конкретных условиях экспериментально.

Приём сейсмических волн основан на следующих основных вариантах установки сейсмоприёмников: 1) на обнажении массива горных пород в горной выработке в замес алебаstra, 2) крепление геофонов на анкер, 3) в шпуре, пробуренном по горному массиву (используется трёхкомпонентный шпуровой геофон). Конструкция трёхкомпонентного шпурового геофона разработана в ИПКОН РАН с вертикальным Z-датчиком GS-20DX, по осям X и Y – горизонтальные датчики GS-20DX-2B.

Размещение геофонов на бортах выработок шахт при помощи алебаstra осложнено зоной непрочного контура, также немалое влияние на качество сигнала оказывают шумы, распространяющиеся по выработке. Крепление геофонов на анкер требует большого объема подготовительных работ, а также накладывается влияние шумов, распространяющихся по выработке. Наиболее эффективным является размещение геофонов в шпурах, поскольку это обеспечивает изоляцию от шума по сравнению с размещением в открытом пространстве выработки, а также более точное ориентирование сейсмоприёмников.

В зависимости от степени подготовки шахтного поля к очистным работам и от поставленных задач различают следующие виды сейсморазведочных работ, относящихся к стадии эксплуатационной разведки:

– поисковые работы, проводимые с целью обнаружения нарушений горного массива на перспективных участках шахтного поля; работы осуществляются методом МОВ и по данным МСП, если участок оконтурен горными выработками (блочный метод подготовки шахтного поля);

– детальные, проводимые с целью выявления и картирования нарушений и зон их влияния (технологический прогноз); осуществляются комплексом МОВ и МСП;

– детальные, проводимые с целью выявления и трассировки геологических нарушений впереди фронта очистных работ (впереди забоя); эти наблюдения особенно важны для шахт, разрабатывающих горный массив по сплошной системе; они осуществляются методом сейсмической локации (МСЛ).

Выбор метода шахтных сейсморазведочных работ зависит от конкретных условий применения исходя из поставленных задач, горнотехнических и горно-геологических условий.

Метод отраженных волн (МОВ) основан на возбуждении и регистрации упругих колебаний в границах исследуемых слоев и выделении волн различных типов, отраженных от неоднородностей строения массива горных пород.

Значимые возможности МОВ лежат в выявлении из одиночной горной выработки трассирования тектонических разрывных нарушений и картировании размывов угольного пласта (соответственно, с амплитудой смещения или с глубиной эрозионного среза более половины его мощности). Достоверность метода зависит от горно-геологических условий и находится в пределах 70–90%.

В шахтной сейсморазведке при исследованиях по МОВ основной корреляционной системой, используемой на практике, является система наблюдений с общей глубинной точкой – МОВ ОГТ (МОГТ) с многократным перекрытием, в принципе аналогичная применяемой в наземной сейсморазведке [26, 61]. Однако для работы по МОВ ОГТ в подземном варианте требуется наличие горной выработки, пройденной по изучаемому массиву горных пород. Взаимное положение этой выработки и исследуемого геологического нарушения должно соблюдать такое условие, чтобы волна, отражаясь от него, соблюдала законы геометрической сеймики, вернулась к установленным в выработке сейсмоприёмникам.

Для получения надёжных прогнозов соблюдаются следующие, отвечающие разрешаемой способности МОВ, требования:

– протяжённость горной выработки, из которой производятся исследования, должна быть не менее 100–150 м для выполнения МОВ по системе многократного перекрытия МОВ ОГТ и не менее 40–50 м для выполнения МОВ с одиночной расстановкой и накоплением от нескольких пунктов возбуждений, располагаемых, как правило, по обеим сторонам расстановки сейсмоприемников;

– прогнозируемый дизъюнктив должен быть с амплитудой не менее половины мощности массива с углом падения плоскости сместителя не менее 27–30° и располагаться под углом встречи с профилем наблюдения в выработке не более 60–70°;

– расстояние между нарушением и измерительным профилем (горной выработкой) должно быть не более 150-кратной мощности массива. Достигнутая дальность прогноза нарушений массива горных пород МОВ – до 250 м.

Выбор системы наблюдений. Наиболее полное представление о положении отражающего объекта вдоль профиля получают, применяя систему непрерывного профилирования, обеспечивающую непрерывное прослеживание отражающей границы вдоль всего участка, на котором проводятся сейсмические наблюдения. Основной рекомендуемой системой является фланговая – с выносом источника [57].

Если непрерывное профилирование затруднительно, возможна комбинация сейсмозондирований, обеспечивающая прослеживание отраженной границы с прерывной взаимоувязкой отражений. При этом вынос взрывного источника располагается на участке, на котором невозможно (или затруднительно) устанавливать СП.

В сложных условиях (низкий уровень полезного сигнала) при необходимости непрерывного прослеживания положения объекта разведки вдоль горной выработки применяется методика непрерывного профилирования многократным перекрытием методом общей глубинной точки (МОГТ).

Метод сейсмического просвечивания. Основой метода сейсмического просвечивания (МСП) является возбуждение и регистрация упругих колебаний,

распространяющихся сквозь массив горных пород в границах исследуемых слоёв и в анализе динамических и кинетических параметров волн различных типов.

Область применимости МСП заключается в выявлении и картировании: разрывных нарушений при оценке их амплитуды и зон влияния (повышенной трещиноватости массива и вмещающих пород); размывов угольных пластов и их кровли; кластических инъекций; зон ПГД; связанных пликативных нарушений. Применяется МСП и тогда, когда использование МОВ затруднено из-за взаимного расположения профиля наблюдения и исследуемого нарушения (например, если угол встречи дизъюнктива профилем наблюдений превышает $60\text{--}70^\circ$). Надежность метода составляет 80%.

Обязательным условием применения МСП является наличие минимум двух горных выработок по изучаемому массиву горных пород (например, штрек и разрезная печь; вентиляционный и конвейерный штреки; штрек и очистной забой и т. п.). В одной горной выработке размещаются сейсмоприёмники, а в другой источники возбуждения сигнала. Максимальная дальность (глубинность) исследований МСП около 800 м. Исследования МСП осуществляются для решения двух задач: поиска, выявления, картирования и определения типа и параметров «скрытых» нарушений, не выявленных горными работами (задача более сложная); прослеживания и картирования нарушений, вскрытых горной выработкой. В качестве информативных параметров используются характеристики волн поляризации Лява и Релея.

Метод сейсмической локации. Основой метода сейсмической локации (МСЛ) впереди забоя выработки является возбуждение и регистрация упругих колебаний непосредственно на груди забоя и выявление волн различных типов, отраженных от неоднородностей строения массива горных пород.

Методология сейсмолокации создана для изучения из забоя подготовительной горной выработки с целью оперативного получения информации о нарушенности массива, гарантирующей вероятность своевременной корректировки проведения горных работ с учётом найденных нарушений впереди забоя. Область применения МСЛ – определение впереди забоя местоположений

разрывных нарушений рудного тела, участков его размывов, а также зон ПГД с надежностью (на глубину до 60 м) 80–85%. Глубина зондирования разрывных нарушений может достигать 100–120 м по нормали к простиранию плоскости сместителя разрывного нарушения при минимальном удалении нарушения от забоя горной выработки 10–20 м, при этом простирание плоскости сместителя может составлять угол более $\pm 45^\circ$ к оси проходимой горной выработки.

Исследования МСЛ осуществляют методом отражённых волн, совместно используя способы регулируемого направленного возбуждения (МНРВ) сейсмических волн и регулируемого направленного приёма (МРНП) [31]. МНРВ применяют с целью оптимизации условий отражения сейсмических волн от объектов разведки, что обеспечивается дискретным, с некоторым угловым шагом сканирования, фронтом возбуждаемых информативных волн, стремясь, с одной стороны, добиться при этом минимизации угла падения сейсмических волн на объект разведки, а с другой стороны, добиться, чтобы отражённый луч максимального вектора диаграммы направленности информативных волн попал в окрестность точки установки сеймоприёмника, принимаемого за центр базы суммирования. За информативные принимают поперечные SH-волны и каналовые волны Лява.

Выше приведены лишь основные модификации шахтных сейморазведочных исследований МОВ, МСП и МСЛ. Существует и применяется на практике, в зависимости от конкретных горно-геологических и горнотехнических условий, целый ряд систем и способов наблюдений этими методами, описанный в специальной литературе [57].

Обоснование выбора метода ультразвукового каротажа

Геофизические методы исследования скважин предназначены для составления геологической документации разрезов скважин, обнаружения и промышленной оценки полезных ископаемых, проведения контроля за месторождениями, исследования технического состояния скважин и т. д. Для решения этих задач по данным методов ГИС проводят изучение физических свойств горных пород в скважинных условиях. В свою очередь, ГИС основаны на

различных методах: электрических, магнитных, радиоактивных, термических, акустических, газовых и других. С помощью геофизических методов представляется возможным получить комплекс физических характеристик по отснятым разрезам скважин, таких как удельное электрическое сопротивление, радиоактивность, теплопроводность изучаемых сред, скорость распространения упругих волн в них и другие.

Итоговым результатом проведенных геофизических исследований являются такие физические параметры, изучаемые методами ГИС, как пористость, трещиноватость, проницаемость, глинистость пород, коэффициент нефтегазонасыщения порового пространства. Правильная оценка получаемых параметров представляет важный этап процесса интерпретации геофизических данных. Интерпретация может быть качественной при определении литологического состава породы и количественной при оценивании количества того или иного компонента, содержащегося в породе [62, 63, 64]. Методы ГИС находят большое применение также при контроле технического состояния скважин и при исследовании действующих скважин в процессе разработки месторождений.

Электрические методы основываются на изучении удельного сопротивления, диффузионно-адсорбированной и искусственно вызванной электрохимической активности горных пород. Удельное электрическое сопротивление служит основой для методов кажущихся сопротивлений, включая метод микрозондов (микрокаротаж), сопротивлений экранированного заземления и индукционного. Способность горных пород подвергаться поляризации под действием электрического тока используется в методе вызванной поляризации, а различие в диффузионно-адсорбционной активности нашло применение в методе самопроизвольной поляризации.

Магнитный метод применяется для измерения магнитной восприимчивости горных пород. Сам метод основан на изменении магнитного поля пород в исследуемой скважине, которое может быть создано искусственно или сформировано за счёт самих пород. Данный метод приоритетно используется для проверки технического состояния ствола скважины. Горные породы отличаются

друг от друга по характеристикам проводимости электроразряда. Для максимально продуктивной работы с помощью данного метода необходимо знать способность электросопротивления породы, с которой придётся иметь дело. Суть проведения исследований заключается в использовании специального зонда в шахте для измерения электрического поля. В дальнейшем полученные данные обрабатываются в ходе математического и физического анализа, с помощью которых рассчитывают основные характеристики месторождения.

Радиоактивные (ядерные) методы используются для измерения в скважинах естественного и искусственного радиоактивного излучения пород. Для искусственного возбуждения применяются методы нейтронный, гамма-гамма, наведенной активности и радиоактивных изотопов. Проводят изучение плотности скважины, её пористости, количества угля, наличия в грунте водорода или других газов. Данный способ исследований имеет следующие подвиды: гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтронный и ядерно-магнитный.

Гамма-каротаж применяют для измерений гамма-излучений пласта. Измерительный зонд оснащен специальным детектором, позволяющим улавливать гамма-квантовые волны, которые он в дальнейшем трансформирует в электроимпульс и передаёт в блок управления для последующей обработки и получения показателей. Данный метод используется для исследований в закрытых скважинах (внутри обсадной трубки), где использование электрического способа недопустимо.

Гамма-гамма-каротаж нашёл применение в проверке искусственного происхождения радиоактивности пласта. Исследуемая скважина подвергается гамма-облучению, в результате которого приборы фиксируют воздействие ответных волн. Благодаря данному исследованию получают данные о наличии излучений, которые невозможно зафиксировать без искусственного стимулирования.

Нейтронный каротаж имеет схожий принцип, но облучение достигается с помощью использования нейтронных волн.

Ядерно-магнитный метод исследования применяется для наблюдения за изменением ЭДС, которое возникает в породе после её обработки поляризующим магнитным полем.

Термический метод используется для изучения распределения температуры по стволу скважины. Применяется исключительно для контроля работы в уже имеющихся скважинах. В скважину опускается специальный термометр для проверки её состояния. По полученным данным (изменение температуры) определяют целостность структуры и наличие дефектов обсадной колонны скважины. Исследование осуществляется за счёт определения природного теплового или искусственного поля, а также методом охлаждения.

Акустический (ультразвуковой) метод заключается в изучении характеристик упругих волн ультразвукового и звукового диапазона в горных породах. Метод заключается в возбуждении упругих колебаний, которые распространяются внутри скважины и в окружающих породах. Данные колебания фиксируются приёмниками, расположенными в той же скважине (рис. 3). Значение звукового сигнала напрямую зависит от плотности пород, ввиду чего время его прохождения может сильно варьироваться. Получаемые данные ультразвукового каротажа в комплексе с другими геофизическими методами позволяют определять пористость пород, выделять области трещиноватости и кавернозности в карбонатном разрезе, уточнять литологию разреза, получать информацию о техническом состоянии скважин, вычислять средние и пластовые скорости распространения упругих колебаний. Для исследований используется специализированное звуковое и ультразвуковое оборудование, как правило, состоящее из зонда и блока управления.

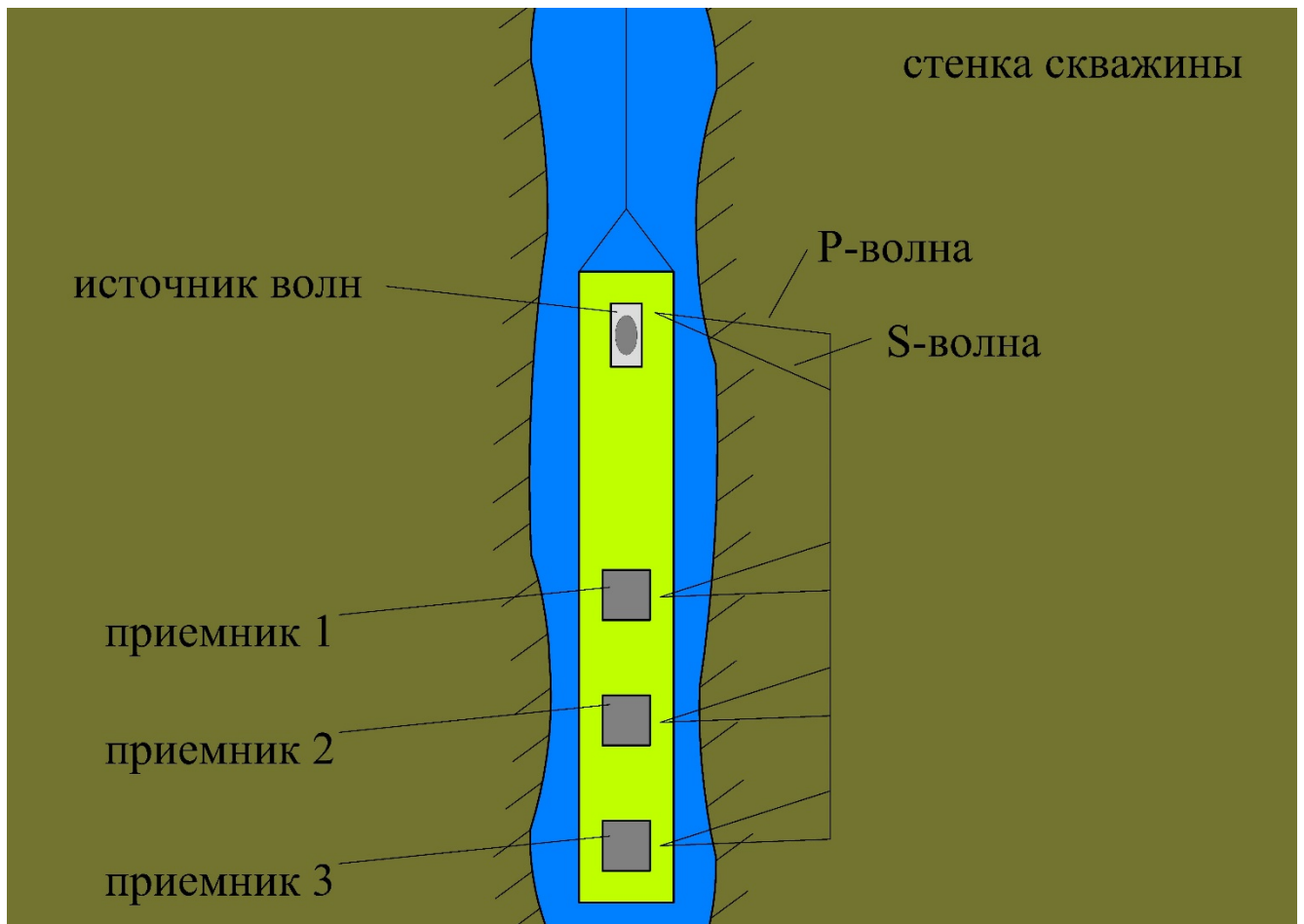


Рисунок 3. Схема проведения исследований методом ультразвукового каротажа

Газовый метод служит для определения количества углеводородных газов в скважине. По результатам газового каротажа представляется возможным выделять газо- и нефтенасыщенные пласты. Для отбора газа из циркулирующего по скважине бурового раствора используются дегазаторы активного и пассивного действия. Содержание газа измеряется чувствительным газоанализатором, который разделяет газовую смесь на отдельные углеводороды и определяет их количество. Качество полученных результатов зависит от вида применяемого раствора, интенсивности циркуляции, скорости выбуривания скважины и др.

Кавернометрия основана на определении зависимости диаметра скважины от её глубины. Для исследований используются специальные приборы, как пример – рычажный каверномер. С помощью данного прибора возможно вычислить размер обсадной трубки, контролировать состояние ствола скважины при бурении, рассчитывать интервалы установки герметизирующих устройств, определять

необходимое количество цемента для герметизации затрубного пространства при обсадке скважины колонной труб.

Механический метод используется для изучения механических свойств пород в процессе бурения скважин. Его основные задачи состоят в корреляции разрезов скважин, определении литологии и глубины залегания пройденных пород, выделении и оценке запасов полезных ископаемых, а также контроле за разработкой месторождения.

Фундаментом методов геофизического изучения полей напряжений является измерение широкого спектра параметров разнообразных физических полей, существующих в литосфере, которые косвенным образом (корреляционно или функционально) связаны с параметрами поля напряжений. В процессе применения геофизических методов для исследования полей напряжений приходится сталкиваться с различными факторами, которые влияют на параметры этих полей (гравитационное, геотермическое, геомагнитное, геоэлектрическое и др.). К факторам, оказывающим существенное влияние, можно отнести обводнённость, трещиноватость, магнитные бури, промышленные шумы и т. д. Всё это существенно влияет на проведение данных исследований для оценки напряжённо-деформируемого состояния массивов горных пород.

В различных источниках литературы рассматриваются случаи успешного применения для оценки напряжений разнообразных модификаций электрометрического [65], звукометрического, реометрического [66], геомагнитного [67] и гамма-методов [66]. В данной диссертации рассматривается акустический метод (ультразвуковой каротаж) для оценки состояния массива горных пород по глубине. Выбор данного метода объясняется его более значимыми преимуществами перед другими геофизическими методами. К первому преимуществу можно отнести функциональную связь параметров поля напряжений с параметрами поля упругих волн, которые возбуждаются искусственно в напряженной среде. Ко второму – возможность метода варьировать масштаб измерений (исследуемый объём), производя изменение частоты зондирующих импульсов [68].

1.6. Выводы и постановка задач исследований

Анализ рассмотренной литературы показал, что наиболее перспективным из геофизических методов для мониторинга нарушенности переходной зоны под дном карьера в его технологическом аспекте является метод сейсмического просвечивания и ультразвукового каротажа в силу следующих факторов:

- оба метода имеют широкое распространение с богатой научной базой, а также оснащены высокоточной искробезопасной аппаратурой для шахт и рудников;

- в обоих методах автоматизирован процесс передачи и обработки информации;

- применение данных методов не вносит значительных нарушений (в сравнении с другими методами) в шахтный массив;

- сейсмический метод в комплексе с ультразвуковым позволяет сделать оценку текущего состояния переходной зоны под дном карьера и картирование возможных областей повышенной трещиноватости, а соответственно, и фильтрации.

С целью повышения эффективности геофизических исследований в данном направлении было решено создать собственную шахтную сейсмостанцию, для чего был проведён анализ рынка аппаратуры для сейсмического просвечивания. Её основными преимуществами перед существующими аналогами являются отсутствие соединительных кабелей для синхронизации и связи регистраторов, свобода выбора схем измерения и шага расстановки геофонов, трёхкомпонентность записи, решение задачи сейсморазведки и мониторинга, компактность и малый вес.

Ультразвуковой каротаж выполняется с целью оценки строения рудного массива по глубине, для исследований используется разработанный в ИПКОН РАН ультразвуковой комплекс УК-2010. Сейсмическое просвечивание осуществляется для сравнения текущего состояния переходной зоны на горизонтах, для обработки

и интерпретации результатов сейсмического просвечивания используется хорошо себя зарекомендовавший метод томографического восстановления данных.

Обработка ультразвуковых и сейсмических материалов выполняется по стандартным методикам, подробно описанным в литературе [69, 70].

При обработке и интерпретации необходимо учитывать также и физико-механические свойства. На горизонте -210 были организованы маркшейдерские исследования для установления величин деформаций подрабатываемого массива горных пород и характера их развития.

Вышеупомянутые методы получили широкое распространение в горной промышленности, по ним накоплен большой научный материал, который постоянно анализируется и обобщается. Но в силу своих технических возможностей и области применения каждый из рассмотренных методов ограничивается только лишь решением конкретных задач. Вышеуказанные методы по отдельности не позволяют решить проблему мониторинга геомеханических процессов в переходной зоне при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений. Поэтому, только на основе комплексного использования и совместного анализа результатов данных методов можно создать методику, позволяющую получить информацию о тенденции развития геомеханических процессов в переходной зоне.

Диссертационная работа направлена на разработку методики мониторинга нарушенности переходной зоны под дном карьера, позволяющей обеспечить безопасные и благоприятные условия отработки запасов полезных ископаемых при системе разработки под дном карьера, что определяет её актуальность и значимость.

По итогу проведенного анализа состояния изученности вопроса оценки строения, нарушенности и изменения во времени геомеханического состояния переходной зоны сформулирована цель работы и задачи исследований для ее достижения.

2. МЕТОДИЧЕСКОЕ, ТЕХНИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА

2.1. Теоретические основы проведения геофизических исследований

2.1.1. Ультразвуковой каротаж

Основной целью геофизических исследований является оценка текущего геомеханического состояния переходной зоны под дном карьера и разработка методики мониторинга свойств слагающих её горных пород.

При этом решается задача определения упругих характеристик рудного массива на нижележащих горизонтах посредством ультразвуковых каротажных скважин.

Ультразвуковые измерения (УЗК) в вертикальных скважинах выполнены по хорошо известной методике [69, 70]. Обработка данных ультразвукового каротажа заключается в выделении и корреляции продольных и поперечных волн, вычислении скоростей распространения и последующем построении каротажных диаграмм.

В нормальных условиях, т. е. ниже уровня воды, должны уверенно регистрироваться продольные (P) и поперечные (S) волны. На рисунке 4 показан пример типичной ультразвуковой сейсмограммы с выделением первых вступлений продольной волны. На рисунке 5 представлен пример типичной ультразвуковой сейсмограммы, полученной при продольном профилировании, где в качестве примера дана корреляция поперечной волны (S).

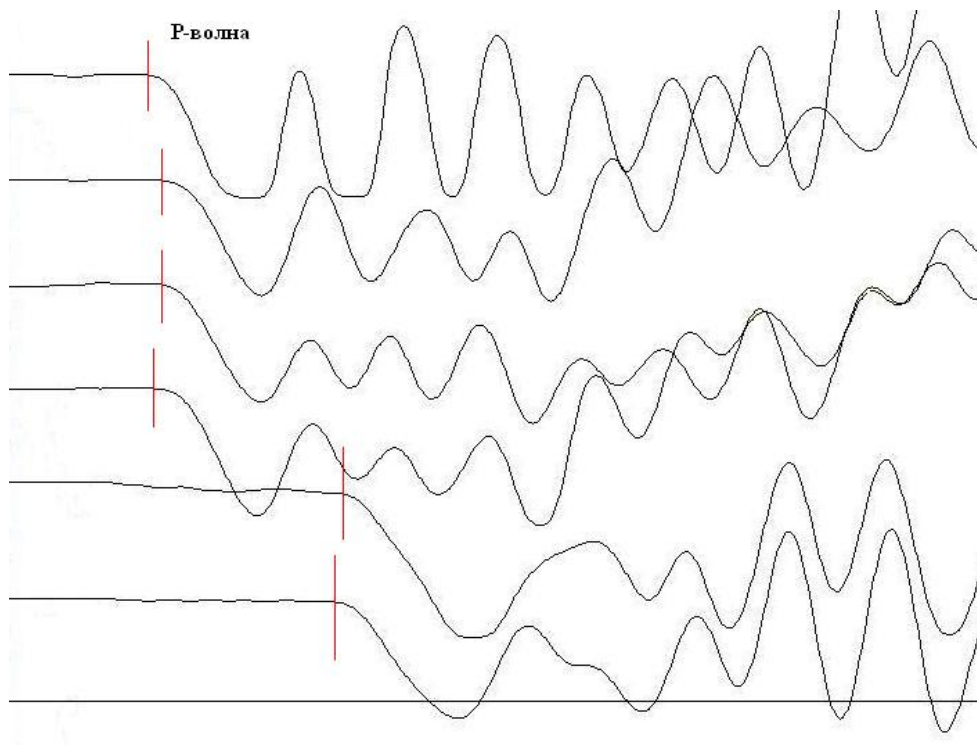


Рисунок 4. Пример ультразвуковой сейсмограммы с выделением первых вступлений продольной волны

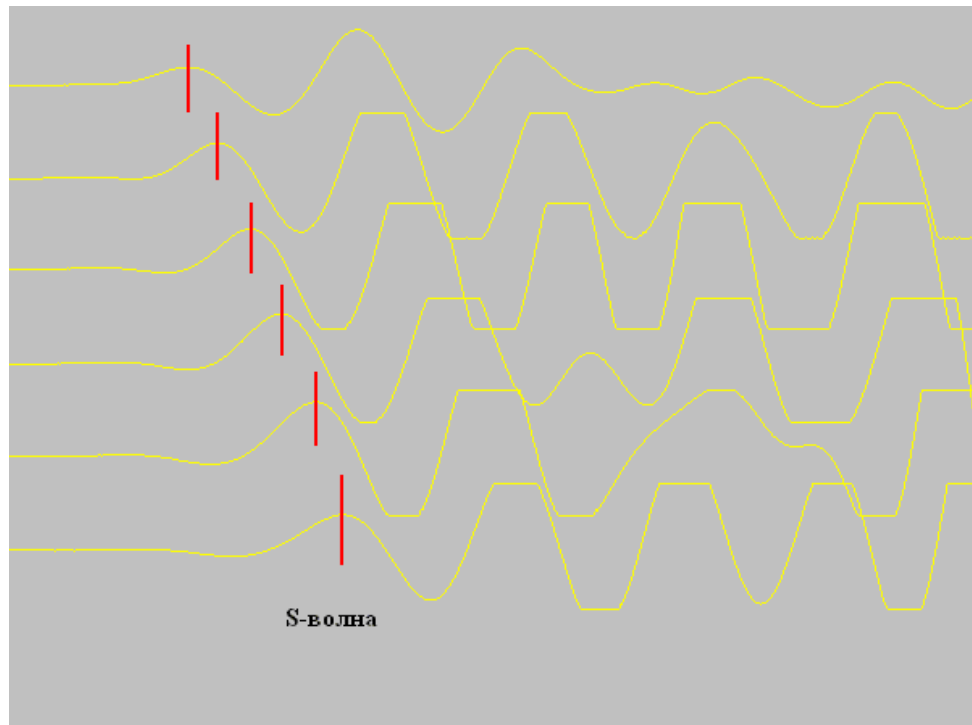


Рисунок 5. Пример ультразвуковой сейсмограммы при продольном профилировании с выделением максимумов поперечной (S) волны

2.1.2. Метод сейсмического просвечивания

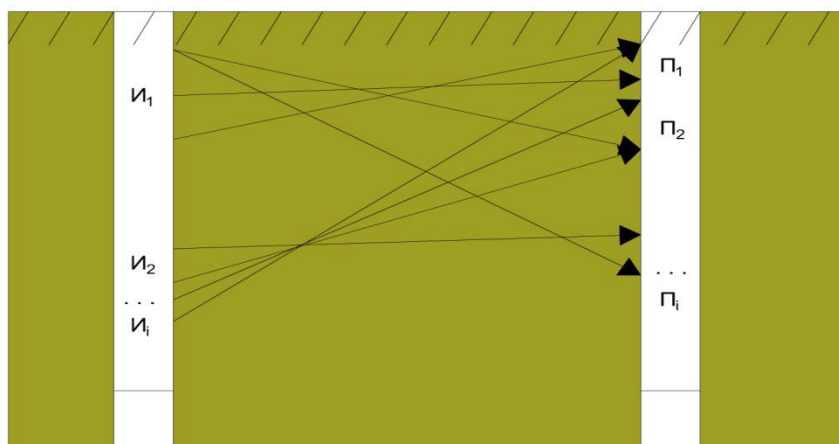
Сейсмический метод оценки строения и физико-механических свойств массива горных пород в различных модификациях применяется в настоящее время при разработке крупнейших месторождений всего мира. Его модификации позволяют решать широкий круг задач по прогнозированию типов и параметров нарушенности породного массива как при открытых разработках, так и при подземных.

В настоящее время многие организации активно используют сейсмический метод просвечивания (МСП), по нему накопили большой объем экспериментального материала, который анализируется и обобщается [71]. Ведутся работы по созданию новой и модернизации существующей регистрирующей аппаратуры [72, 73]. Теоретические исследования направлены на изучение все более тонких механизмов возбуждения, распространения, регистрации и анализа сейсмоакустических волновых полей. Вместе с тем процессы формирования волнового поля и его взаимодействия с породным массивом настолько сложны, а регистрируемые упругие колебания несут такой огромный объем информации о строении и физико-механических свойствах пород, не поддающейся на данном этапе полному анализу и интерпретации, что говорить об исчерпании всех возможностей сейсмического метода преждевременно.

Эффективность и надежность прогнозирования перечисленных типов нарушений сейсмическим методом просвечивания колеблется в довольно широком диапазоне (0,65–0,97), так как остается теоретически не исследован ряд вопросов взаимодействия различных составляющих волнового поля с тем или иным типом и параметрами нарушения. Поэтому до конца не могут быть решены вопросы методики проведения экспериментальных исследований и выбора оптимального графа обработки и интерпретации получаемых материалов с реальных объектов.

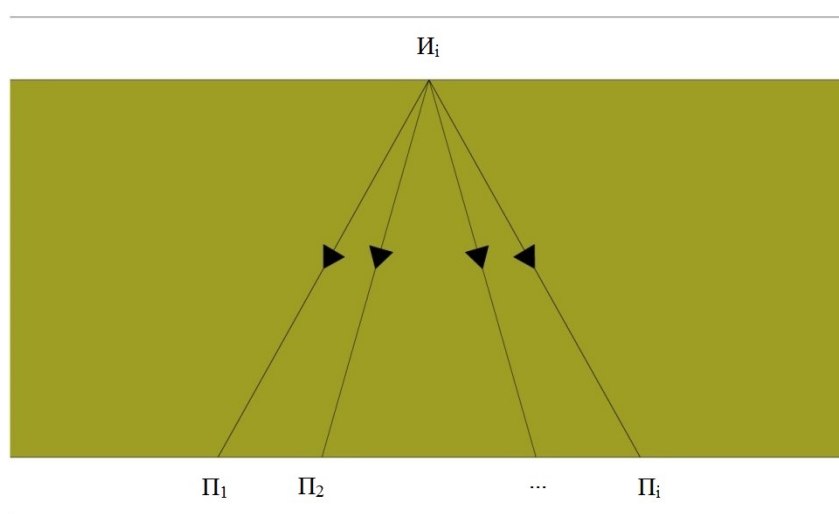
Под методом сейсмического просвечивания (МСП) понимается способ изучения горного массива либо между горными выработками, либо между скважинами.

В одной выработке размещаются источники возбуждения колебаний, в другой – приёмники (рисунки 6, 7).



$И_i$ – источник; $П_i$ – приёмник

Рисунок 6. Межскважинное прозвучивание



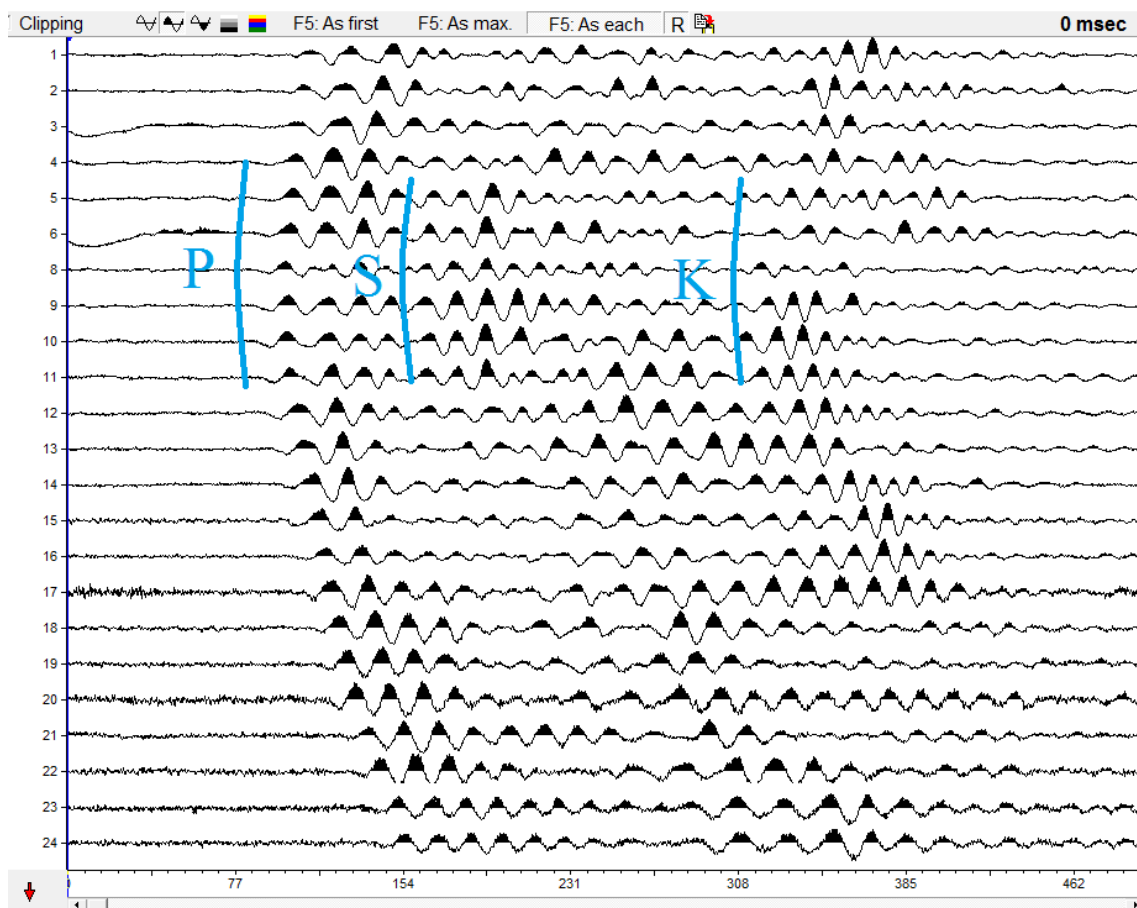
$И_i$ – источник; $П_i$ – приёмник

Рисунок 7. Верное просвечивание

Опыт ИГД им. А.А. Скочинского при проведении исследований по методу сейсмической томографии показал, что интервал между пунктами возбуждения должен составлять порядка трёх длин волн в фазе Эйри, а между сейсмоприёмниками – порядка одной длины волны. Обычно это составляет, соответственно, 30 и 10 м.

Сигнал возбуждается различными способами. Основные из них – взрывы и удары, также можно применять множество различных способов для возбуждения (к примеру, удары ковша по рудному телу).

Структура сейсмограммы – продольные и поперечные волны, распространяющиеся по вмещающим породам, и каналовые волны (рисунок 8).



P – продольные волны; S – поперечные волны; K – каналовые волны

Рисунок 8. Пример волновой картины при МСП

Структура сейсмограммы:

- 1) прямая продольная волна (P), распространяющаяся по вмещающим породам и имеющая самую высокую скорость;
- 2) прямая поперечная волна (S), распространяющаяся по вмещающим породам;
- 3) каналовые волны, идущие вдоль штрека по рудному телу;
- 4) отраженные от нарушения каналовые и боковые волны [74].

2.2. Техническое обеспечение геофизических исследований

Особые требования предъявляются к шахтной геофизической аппаратуре, которая должна быть выполнена в искро- и взрывобезопасном исполнении и допускается к использованию в шахтных условиях только по разрешению специализированных организаций. Всё это выделяет шахтную геофизику в самостоятельное направление, требующее разработки специальной методологии, сбора и интерпретации результатов.

2.2.1. Шахтная беспроводная сейсмостанция

В ИПКОН РАН выпустили опытный образец шахтной беспроводной сейсмостанции на базе автономного трёхканального сейсмического регистратора [75, 76, 77], включающей двадцать четыре рекордера, аналогичное количество зондов и устройство синхронизации (рис. 9).



Рисунок 9. Сейсмостанция беспроводная шахтная

Работа сейсмостанции заключается в постоянной записи регистрируемого трехосными зондами сейсмического сигнала в породном массиве.

Ударопрочный корпус рекордера выполнен из полистирола с прозрачным покрытием из полиэтилентерефталата. В нем расположена система из трех печатных плат с подключенным силовым элементом в виде аккумуляторной батареи, залитой диэлектриком (рис. 10). Рекордер неразборный и, следовательно, неремонтопригодный. Шина данных у рекордера включает в себя 24-битный аналогово-цифровой преобразователь, оборудованный 16 гигабайтной энергонезависимой памятью, достаточной для записи сигнала длительностью 24 часа.

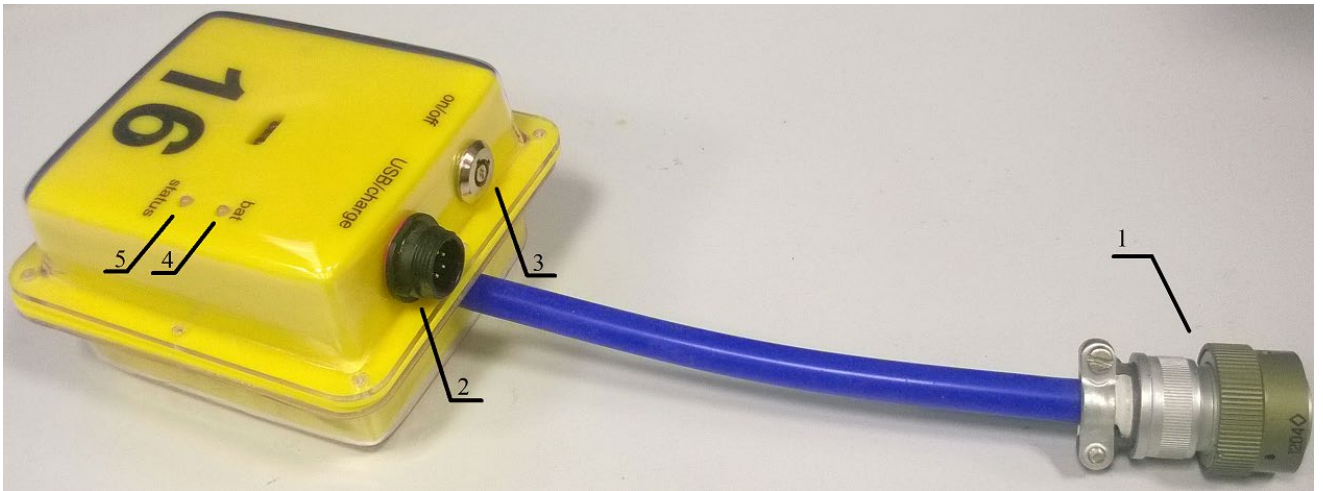


Рисунок 10. Регистратор сейсмический шахтный: 1 – разъём для подключения зонда, 2 – разъём для зарядки и соединения с ПК, 3 – ключ вкл/выкл, 4 – индикатор питания, 5 – индикатор режима работы

На нижней части корпуса располагаются вход для подключения к трехосному зонду; комбинированный вход, служащий одновременно для подключения зарядного устройства и синхронизации с ПК; ключ включения питания типа KDS-1, а также пара светодиодов.

Конструкция без дополнительных соединительных проводников положительным образом сказывается на гибкости в выборе схемы расстановки рекордеров, что влечет за собой отсутствие паразитных электрических наводок и, соответственно, более качественный получаемый сигнал. Синхронизация рекордеров осуществляется следующим образом: они располагаются на ровной поверхности на расстоянии не более метра от блока синхронизации с направленными вверх ИК-портами, и запуск системы производится кнопкой start/stop.

Конструкция трехосного зонда разработана с целью обеспечения корректной ориентации в горной выработке с возможностью его прочного закрепления в зоне контакта с породой посредством пневмоприжима (рис. 11).

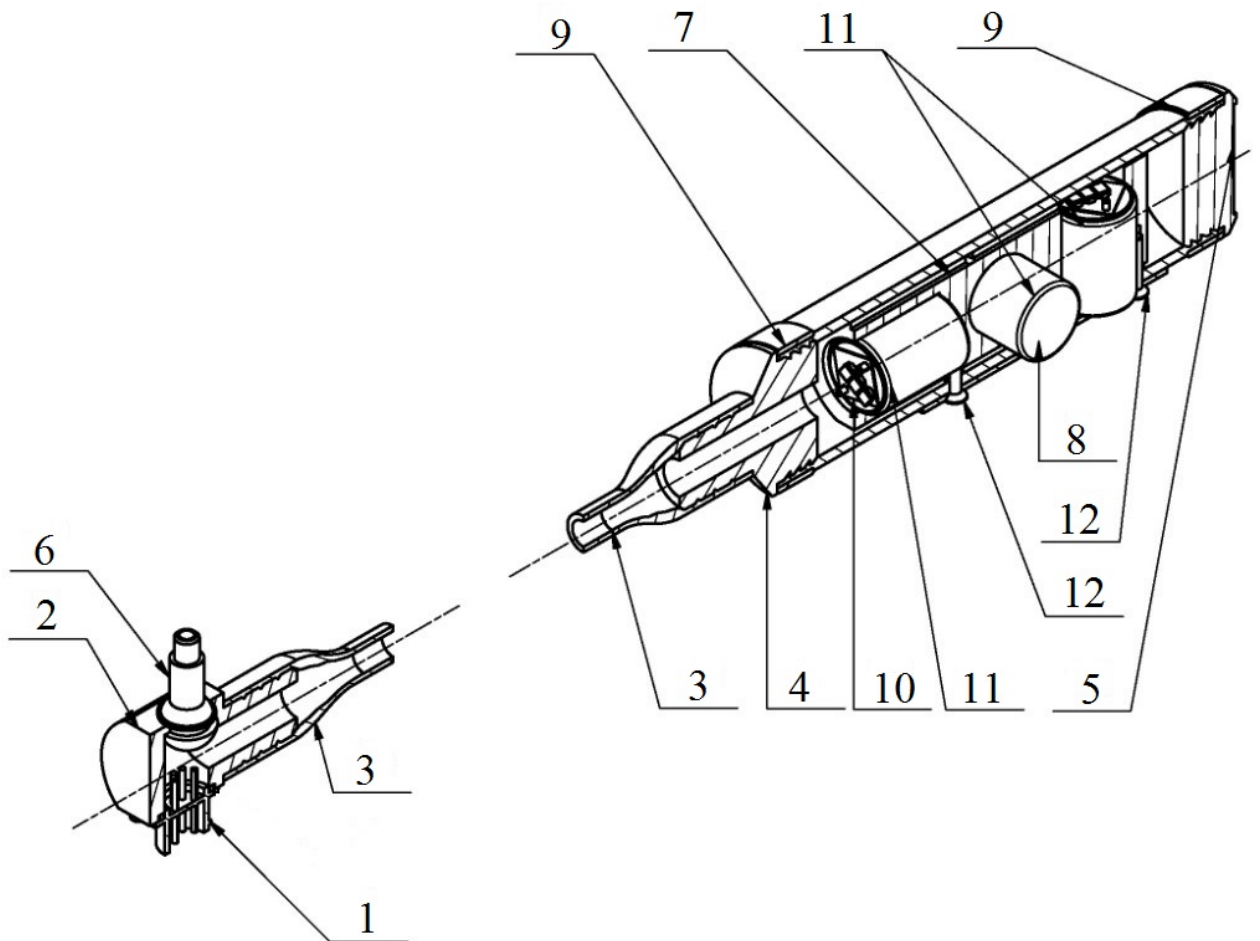


Рисунок 11. Конструкция трехкомпонентного шпурового зонда с пневмоприжимом: 1 – разъём для подключения регистратора, 2 – корпус разъема и ниппеля, 3 – термоусадочная трубка, 4 – заглушка под шланг, 5 – заглушка, 6 – ниппель, 7 – корпус датчиков, 8 – крепежная пластина, 9 – стальное кольцо, 10 – плата диодной защиты, 11 – датчик типа GS-20DX, 12 – винт

Основой конструкции зонда являются три электродинамических датчика, ортогонально расположенных по осям стандарта Z – X – Y для трёхкомпонентной записи сейсмических сигналов. По осям X и Y расположен горизонтальный датчик GS-20DX-2B, по оси Z – вертикальный датчик GS-20DX.

Датчики размещены в специальном корпусе из полиамида, который обеспечивает правильную ориентацию в пространстве. Корпус с датчиками установлен в резиновую трубку и крепится пластиной к стенке трубки. По торцам резиновой трубки, при помощи нержавеющей колец, закрепляются две заглушки, одна из которых выполнена с отверстием для бронированного шланга.

Двухметровая длина шланга позволяет размещать зонд в выработках с ослабленными бортами. На другом конце шланга расположен разъем для подключения к регистратору и ниппель для подключения насоса. Ось каждого датчика обозначена на шильде.

Датчики размещаются в шпурах диаметром 55 мм и предназначены для выполнения сейсмических работ в подземных условиях угольных шахт и рудников. Пневмоприжим обеспечивает надежный контакт с породой не менее суток.

За счёт использования инновационных технологий вес регистратора составляет около 250 граммов, вес зонда не превышает 1,3 кг. Полностью упакованное оборудование уместится в три небольших кейса общей массой 40 кг.

На фоне конкурентов разработанная аппаратура имеет явные преимущества (см. таблицу 1). На протяжении многих лет она успешно эксплуатируется на различных горных предприятиях, где позволяет решать широкий круг задач ввиду своей многозадачности [78–84].

Таблица 1. Сравнение характеристик сейсмической аппаратуры

	PASAT M (EMAG, Польша)	SUMMIT II Ex (DMT, Германия)	РОСА-А (СНИИГГиМС, Новосибирск)	РСШ (ИПКОН РАН, Москва)
Количество каналов на один блок	2	2	4	3
Беспроводность	нет	нет	да	да
Синхронизация	кабель	кабель	GPS	ИК-порт
Режим мониторинга	нет	нет	да	да
Встроенный аккумулятор	нет	да	нет	да
Масса комплекта на 24 канала	426 кг	32,4 кг + кабель	9,6 кг без аккумулятора	6,0 кг с аккумулят.

Как правило, подземные сейсморазведочные работы проводят в ремонтную смену, когда можно обеспечить относительную тишину. Инфракрасный порт и

быстросъёмный разъём для подключения зонда и регистратора позволяют проводить быстрый монтаж и демонтаж оборудования. Компактность и малый вес конструкции обеспечивают мобильность проведения сейсмических работ. Для проведения сейсмических работ базовым комплектом из 24 регистраторов и 24 зондов требуется всего два человека.

2.2.2. Ультразвуковой сеймоскоп УК-2010

При проведении ультразвуковых работ был применён разработанный в ИПКОН РАН комплект ультразвуковой аппаратуры, состоящей из цифровой ультразвуковой станции УК-2010 и семиэлементного шпурового (скважинного) зонда. Корпус зонда выполнен из винипластовой трубы, имеющей низкую скорость упругих волн в материале ($V_p \cong 800$ м/с) и достаточную прочность при высоких поглощающих свойствах. Вдоль корпуса зонда на расстоянии $\Delta l = 0,1-0,2$ м расположены семь одинаковых пьезоэлектрических преобразователя (датчика). Для шпурового зонда применяются датчики из кристаллов сегнетовой соли с резонансной частотой 50 кГц для скважинного зонда с частотой 30 кГц. Кристаллы располагаются в латунных герметичных корпусах (заполненных касторовым маслом), имеющих конические мембраны, позволяющие обеспечить точечный контакт датчиков с породой. Датчики располагаются в резиновых гнёздах, что в сочетании с винипластовой трубой позволяет ликвидировать связь между ними. В основании зонда имеется крепление для излучающего датчика с возможностью регулировки расстояния от зонда (рис. 12).



Рисунок 12. Проведение ультразвуковых работ

Снятые в импульсном режиме (50 Гц) на полудиске из плексигласа, характеристики направленности датчиков зонда совпадают с характеристиками обычных переносных датчиков ультразвука [85, 86]. Ультразвуковой канал вместе с датчиками имеет полосу пропускания около 20–80 Гц. Данное оборудование позволяет свободно выбирать методику наблюдений в зависимости от целей исследований и условий приёма.

2.3. Выводы

Рассмотрены и проанализированы геофизические методы исследований, позволяющие проводить регулярный мониторинг геомеханических процессов, протекающих в переходной зоне под дном карьера при комбинированном ведении горных работ на кимберлитовых месторождениях, с целью установления

характеристик упругих свойств кимберлитов с построением карт распределения скоростей упругих волн для описания строения, нарушенности и мониторинга изменения её геомеханического состояния.

Проведен анализ основных плюсов и минусов современной сейсмической аппаратуры, на основе которого было решено создать специализированную шахтную беспроводную сейсмостанцию, позволяющую эффективно проводить опытно-промышленные работы и определять геомеханическое состояние переходной зоны под дном карьера, а также шахт, опасных по газу и пыли, с возможностью его использования для решения подобных задач на других горнодобывающих предприятиях.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАРОТАЖА И ИНКЛИНОМЕТРИИ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ

3.1. Методика проведения измерений в шахтных условиях

Сейсмическое просвечивание. Объектом исследования являются горные породы переходной зоны под дном карьера при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений. Главной целью было получение сведений о геофизических и геомеханических процессах, происходящих в переходной зоне и в искусственном массиве под влиянием добычных работ в блоке № 1. Кимберлитовая трубка имеет форму крутопадающего трубообразного тела, до глубины 300 м (абс. отм. + 30 м) конусообразного, на глубине от 300 до 900 м (абс. отм. + 30 ÷ -600) её форма представляет цилиндрическое тело. Площадь поперечного сечения рудного тела исследуемых горизонтов составляет 310×140 м (гор. -210) и 320×130 м (гор. -310). Рудное тело на данных горизонтах имеет оконтуривающие выработки, также сквозь него проходят тупиковые очистные ленты.

Проведение сейсмического просвечивания с целью оценки изменения состояния переходной зоны осуществляется между горными выработками, оконтуривающими массив горных пород на исследуемом горизонте, в течение трех лет. Вдоль одного борта в шпуры размещают 24 зонда, подключённых к регистраторам, с шагом 10 метров. Под зонд выбуриваются шпуры диаметром 55 мм на глубину 1–1,5 метра. Под капсули-детонаторы (источник) выбуриваются 28 шпуров на глубину 0,2 метра и шагом между ними 10 метров. Источниками сигнала являются связки электродетонаторов (по 6 шт.). Количество устанавливаемых зондов и капсулей-детонаторов должно создать сетку сейсмических лучей, обеспечивающую детальную картину исследуемого участка рудного тела.

Схема размещения источников (капсюли-детонаторы) и приёмников (трёхкомпонентные зонды) и сетки лучей для горизонта -210 приведена на рисунке 13.

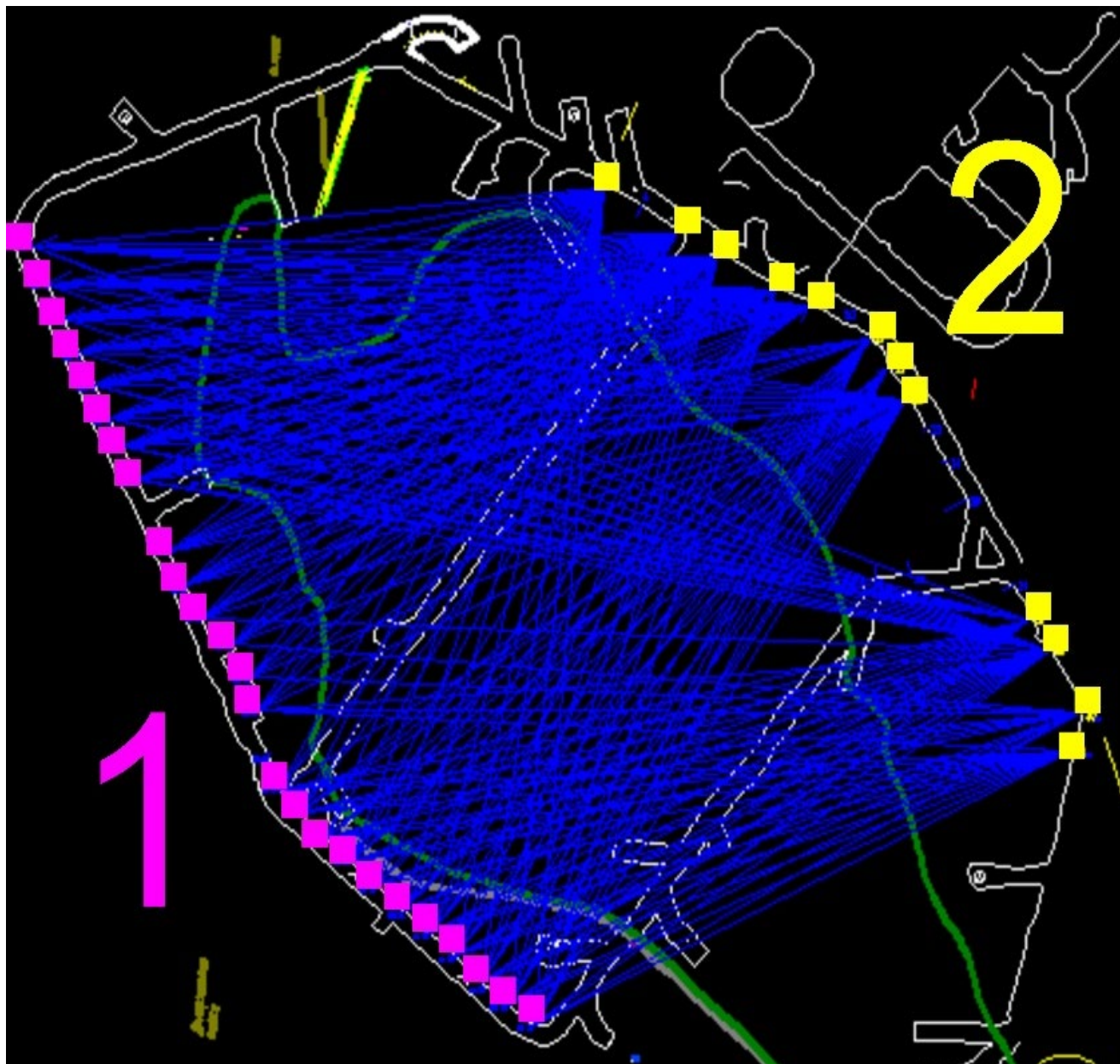


Рисунок 13. Схема размещения источников (1) и приёмников (2), сетки сейсмических лучей на горизонте

Работы по сейсмическому просвечиванию проводятся в ремонтную смену, когда можно обеспечить относительную тишину, минимально влияющую на качество получаемых данных. После монтажа оборудования взрывник с частотой

в пять минут осуществляет поочередно взрывы капсулей-детонаторов, каждый из которых фиксируется трёхкомпонентными зондами. По окончании просвечивания осуществляется демонтаж оборудования и подъём его на поверхность. Полученные данные с каждого регистратора списываются на ПК и обрабатываются специальными программами.

Ультразвуковой каротаж. Работы по ультразвуковому каротажу выполняются с целью оценки строения рудного тела по глубине. На горизонтах –210, –265, –310 пробуриваются восемь вертикальных скважин в рудном теле глубиной около 20 метров. Исследования проводятся по методике непрерывного продольного профилирования (по стенкам скважин), которая позволяет с высокой точностью (98–99%) определить скорости V_p и V_s . Для проведения измерений скважины заполняются водой. В скважину погружают семиэлементный звуковой (скважинный) зонд (частотой 30 кГц) и с шагом 0,1 метра проводят наблюдения, которые фиксирует ультразвуковой сейсмокоп УК-2010. По окончании УЗК осуществляется демонтаж оборудования и подъём его на поверхность. Полученные данные с УК-2010 списываются на ПК и обрабатываются специализированными программами. В результате обработки полученных осциллограмм УЗК по специальной методике [97, 98] составляются таблицы значений времени прохождения упругих волн P и S через заданные интервалы Δl на разных глубинах, т. е. интервальные значения Δt_p и Δt_s по всей исследуемой скважине.

Инклинометрические исследования. Для установления величин деформаций подрабатываемого массива горных пород и характера их развития на исследуемом горизонте устанавливаются наблюдательные станции, состоящие из горизонтальных скважин с размещенными в них глубинными реперами, местоположение которых фиксируется инструментальными измерениями [99]. Также закладывается наблюдательная станция, состоящая из рабочих (деформационных) реперов, размещенных в кровле и бортах выработки (рис. 14).

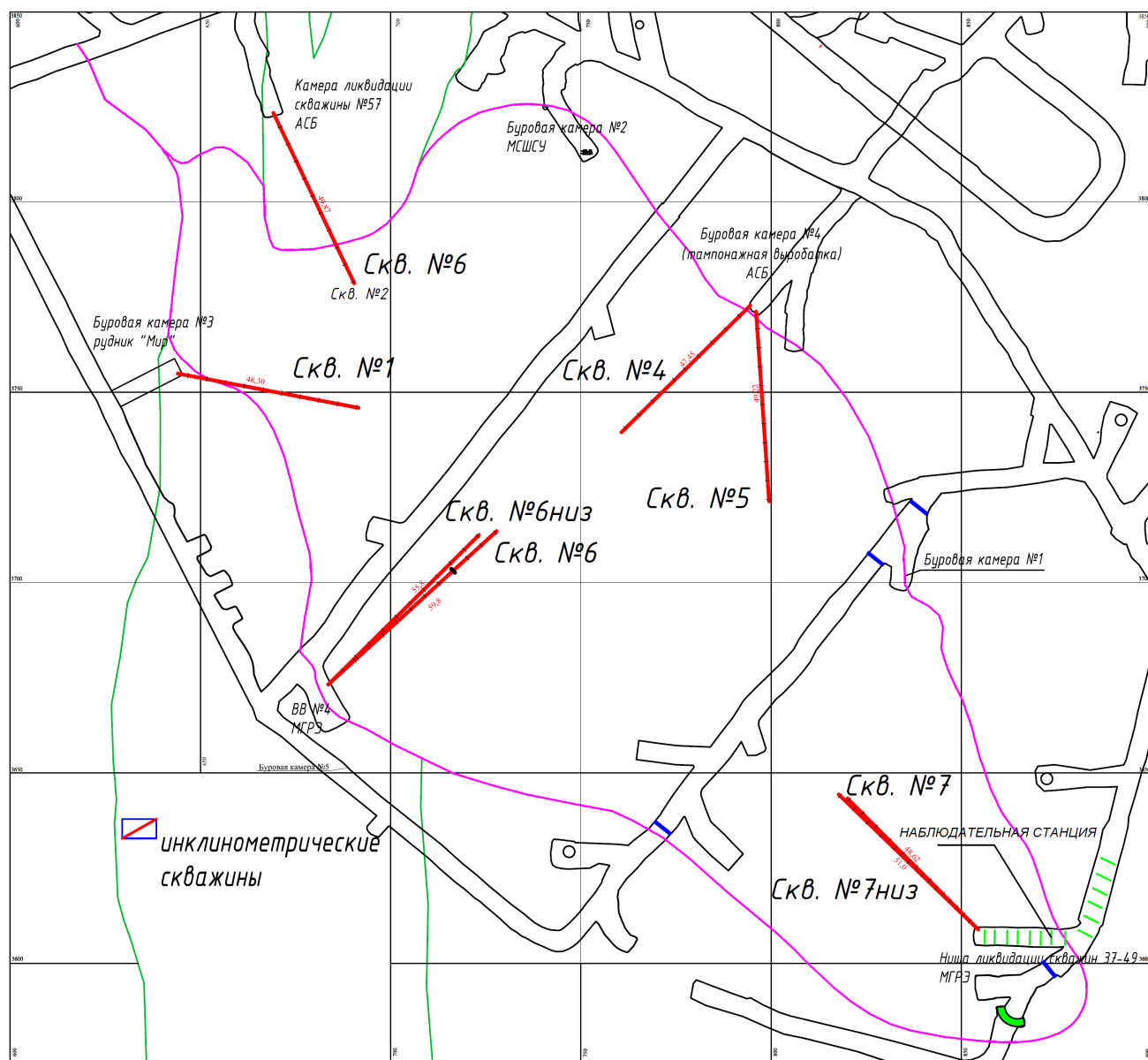


Рисунок 14. Схема расположения скважин и наблюдательной станции на горизонте -210 м исследуемого рудника

Наблюдательная станция состоит из 14 профильных линий с интервалом 3 м. Стенные реперы закладываются в три ряда на каждом борту выработки, высота закладки первого ряда стальных реперов составляет 0,5 м от подошвы выработки, последний ряд закладывается перед линией скругления кровли, оставшийся ряд размещается посередине между двумя рядами. На кровле выработки также размещаются три ряда реперов, один ряд размещается по центру кровли, два других – посередине между заложённым рядом и последним рядом реперов, заложённых

в борта выработки. Опорные реперы располагаются в вентиляционном квершлагае вне зоны влияния горных работ.

Результаты измерений на наблюдательной станции фиксируются в электронном накопителе прибора с дублированием в полевом журнале в соответствии с «Рекомендациями по организации геомеханического мониторинга за ведением горных работ на период эксплуатации и отработки запасов 1-й очереди исследуемого рудника» [100].

Для фиксации горизонтальных и вертикальных сдвижений на горизонте –210 в массив горных пород переходной зоны бурятся девять горизонтальных скважин длиной 50 м каждая. В них помещаются и обсаживаются специализированные трубы с установленными глубинными реперами, местоположение которых фиксируется инструментальными измерениями [99].

Горизонтальные перемещения реперов, расположенных в скважинах, измеряются при помощи магнито-герконового экстензометра. Определение местоположения реперов производится путем проводки магнито-герконового датчика внутри обсадной трубы в прямом и обратном направлениях [101].

Датчиком в данном случае является система из герметизированного магнитоуправляемого контакта (геркона). Геркон представляет собой две пластинки из ферромагнитного материала, расположенные на расстоянии порядка долей миллиметра друг от друга и запаянные в стеклянный баллон диаметром 3–4 мм и длиной 20–40 мм.

В магнитном поле достаточной напряженности пластинки геркона притягиваются друг к другу и замыкают контакт, при уменьшении напряженности магнитного поля они под действием упругих сил размыкаются, возвращаясь в исходное положение. Это свойство геркона и используется в датчике.

Измерения реперов производятся следующим образом. Магнито-герконовый датчик на измерительной ленте опускают внутрь обсадной трубы. В момент срабатывания датчика берутся два отчета по мерной ленте. Первый отчет берется при размыкании контакта (магнитное поле геркона попадает под возмущающее действие репера). Второй отчет берется при смыкании контакта (геркон вышел из

зоны действия репера). Таким образом определяется зона срабатывания. Величина зоны срабатывания датчика зависит от многих факторов (изменения настройки датчика, перекося репера в скважине и т. д.), и поэтому она может меняться, но положение середин зоны сохраняется неизменным. Поэтому местоположение реперов в скважине рекомендуется определять путем вычисления средних значений из четырех отчетов по мерной ленте, взятых в моменты отключения и включения датчика при его проводке в прямом и обратном направлениях. Перемещения датчика по телу скважины происходит с помощью досылщика, который представляет собой сборную конструкцию, состоящую из пластиковых трубок диаметром 1,5–2 см и длиной 2 м с закрепленной на них измерительной лентой [102].

Вертикальные перемещения скважины фиксируются путем периодического проведения инклинометрической съемки тела скважины при помощи инклинометрической измерительной системы DIS500.

Периодичность наблюдений по скважинам осуществлялась не реже одного раза в месяц [103].

Измерения величин перемещений исследуемого участка массива можно разделить на две составные части: измерения вертикальных перемещений (наклоны и кривизна) и измерения горизонтальных деформаций сжатия и растяжения, измерения горизонтальной составляющей процесса сдвигания являются обязательными, так как именно в результате горизонтальных деформаций в массиве появляются секущие трещины [104].

Анализ результатов известных исследований показал перспективность применения методов сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии для определения состояния переходной зоны (рис. 15). Вышеупомянутые методы получили широкое распространение в горной промышленности, по ним накоплен большой научный материал, который постоянно анализируется и обобщается. Но в силу своих технических возможностей и области применения каждый из рассмотренных методов ограничивается только лишь решением конкретных задач. Вышеуказанные методы

по отдельности не позволяют решить проблему мониторинга геомеханических процессов в переходной зоне при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений. Поэтому только на основе комплексного использования и совместного анализа результатов данных методов можно создать методику, позволяющую получить информацию о тенденции развития геомеханических процессов в переходной зоне.

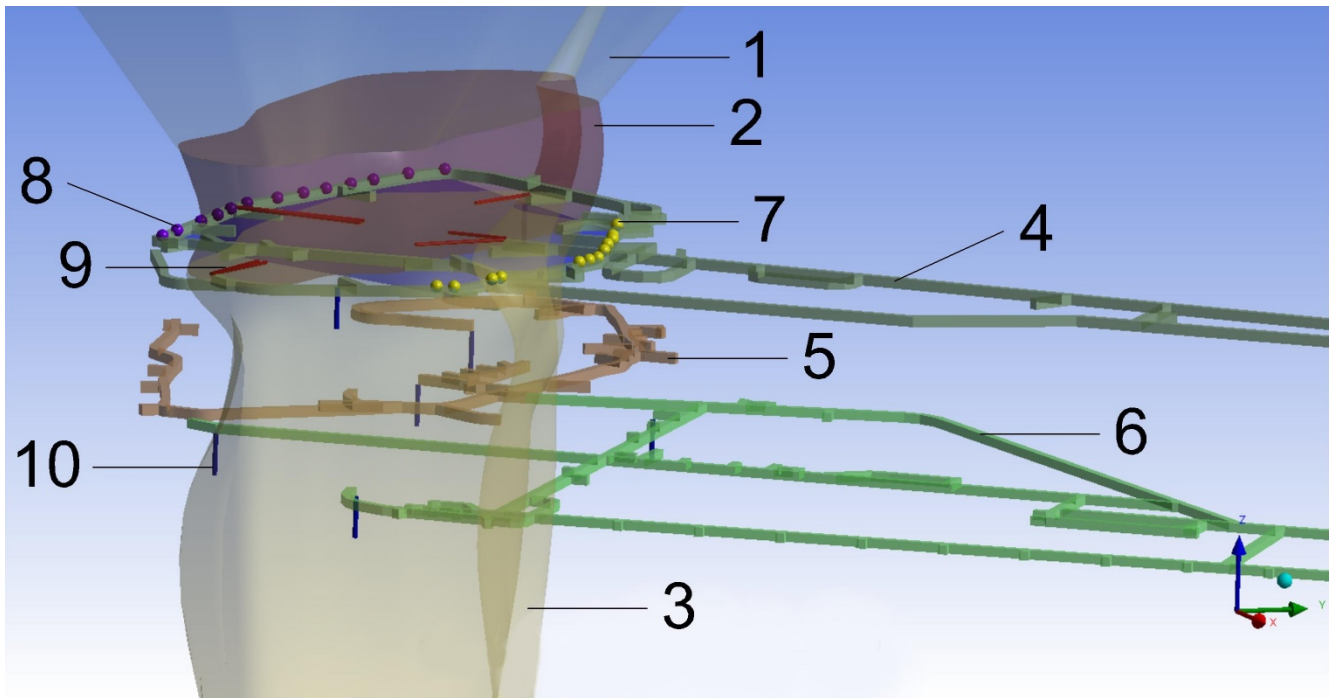


Рисунок 15. Схема проведения натуральных исследований на кимберлитовом месторождении: 1 – карьер; 2 – переходная зона; 3 – рудное тело; 4 – выработки горизонта -210 ; 5 – выработки горизонта -265 ; 6 – выработки горизонта -310 ; 7 – приёмники сигнала МСП; 8 – источники сигнала МСП; 9 – горизонтальные инклинометрические скважины; 10 – вертикальные скважины УЗК

3.2. Методика обработки данных по результатам наблюдений

Метод сейсмического просвечивания. Обработка материалов сейсмического просвечивания проходит в три этапа.

В первую очередь анализируется волновая картина на предмет выделения и идентификации «информативных» волн. Подбирается диапазон полосовой

частотной фильтрации для уверенного выделения и корреляции продольных (P) и поперечных (S) волн. Зная путь, пройденный волной, (L) и время пробега (T), можно определить значения лучевых скоростей ($V = \frac{L}{T}$). На рисунке 16 представлен общий вид зарегистрированной волновой картины.

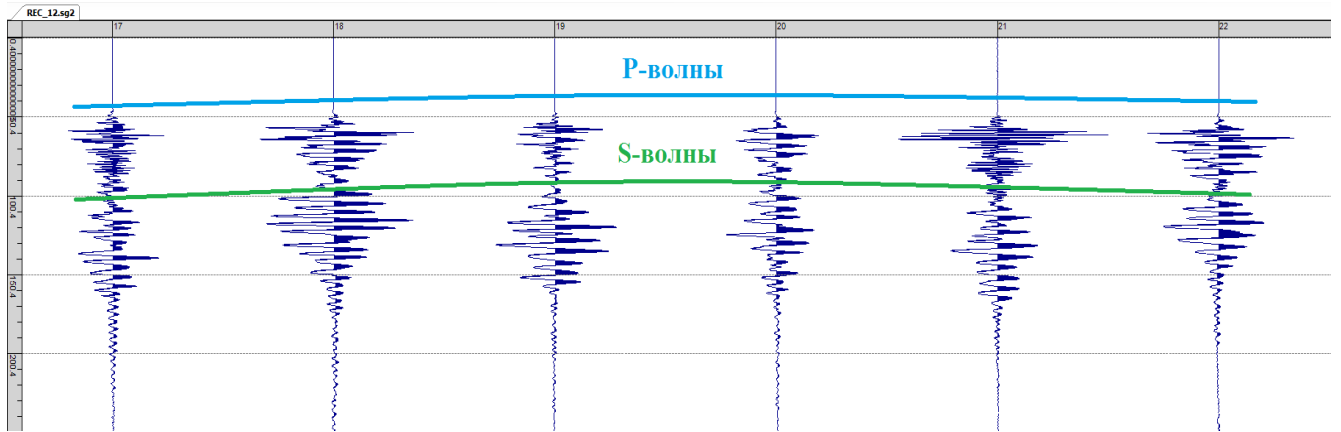


Рисунок 16. Пример регистрируемой волновой картины

На втором этапе обработки материалов производится восстановление скоростного строения переходной зоны методом реконструктивной сейсмической томографии с использованием программы Tomography 1.0 (разработчик – ООО «Инситу»). Такая обработка позволяет выявить неоднородности упругих свойств кимберлитов, в том числе неоднородности, связанные с возможным разуплотнением (разрушением, трещиноватостью) и суффозией. Разрешающая способность метода при данном наборе измерений составляет ~ 10 м.

На третьем этапе на основе данных о скоростях распространения упругих волн рассчитывается динамический коэффициент Пуассона по формуле 1.

$$\nu = \frac{1 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{2\left(1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2\right)}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона, ед.; V_p – скорость продольных волн, км/с;
 V_s – скорость поперечных волн, км/с.

На основе измеренных скоростей и рассчитанного коэффициента Пуассона значение динамического модуля упругости ($E_{\text{дин}}$) вычислено по известной формуле теории упругости:

$$E_{\text{дин}} = V_p^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}, \quad (2)$$

где $E_{\text{дин}}$ – динамический модуль упругости, ГПа; ρ – плотность кимберлита, т/м³.

Для расчета упругих характеристик плотность кимберлита принята $\rho = 2,5$ т/м³ на основании данных института «Якутнипроалмаз» [4].

Метод ультразвукового каротажа. Ультразвуковые измерения в вертикальных скважинах выполняются по стандартной методике [69, 70]. Обработка данных ультразвукового каротажа заключается в выделении и корреляции продольных и поперечных волн, вычислении скоростей распространения и последующем построении каротажных диаграмм. На рисунке 17 – общий вид зарегистрированной волновой картины УЗК.

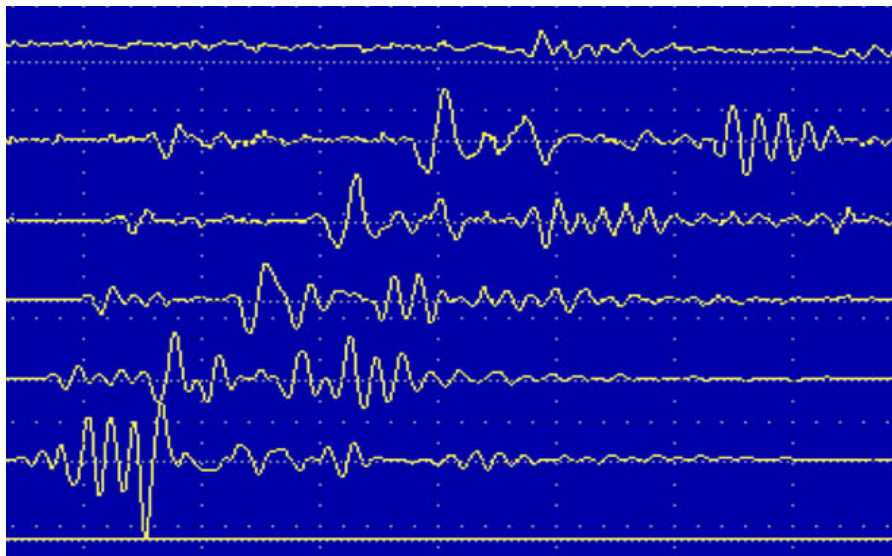


Рисунок 17. Волновая картина УЗК

Инклинометрические исследования. По полученным результатам наблюдений с профильных линий и наблюдательных скважин производится обработка данных по окончании каждой серии измерений, которая включает:

- вычисление и уравнивание координат всех реперов наблюдательных станций;
- вычисление горизонтальных расстояний между реперами профильных линий;
- составление по каждой профильной линии ведомостей: вертикальных смещении реперов, горизонтальных смещений реперов вдоль профильной линии, горизонтальных деформаций (растяжений и сжатий), величин сдвигов, скоростей смещения реперов по направлению векторов смещения;
- составление и пополнение графических материалов: пополнение плана наблюдательной станции и разреза; вертикальных разрезов по каждой профильной линии с уточнением литологии пород и положения горных работ на момент закладки станций и на момент наблюдения появившихся трещин и заколов, графиков вертикальных и горизонтальных сдвижений и деформаций по каждой профильной линии, графиков скоростей смещения реперов по направлению векторов.

По полученным результатам наблюдения за процессом деформирования прибортового массива определяем следующие параметры:

- горизонтальные, вертикальные и полные векторы смещения реперов;
- горизонтальные деформации (растяжения или сжатия);
- наклоны поверхности, примыкающей к борту;
- сдвиг прибортового массива;
- скорость смещения реперов по направлению векторов смещения.

Результаты наблюдений по каждому из реперов позволяют рассчитать величину оседания (мм), т. е. разность в высотных отметках начальной (H_0) и последующих (H_m) серий наблюдений:

$$\eta = H_m - H_0. \quad (3)$$

Также для всех расчётных интервалов между реперами наблюдательной станции производим последовательное вычисление:

- наклонов, мм/м

$$i = \frac{\eta_m - \eta_{m-1}}{l}, \quad (4)$$

где η_m, η_{m-1} – величины оседания, соответственно, m -го и $m-1$ реперов, мм; l – длина интервала между рассматриваемыми реперами по данным начального наблюдения, м;

– кривизны, $1/\text{м}$

$$K = \frac{i_n - i_{n-1}}{l_{cp}}, \quad (5)$$

где i – величины наклонов n -го и $n-1$ интервалов между реперами;

– радиуса кривизны, м

$$R = \frac{1}{K}, \quad (6)$$

– горизонтальных деформаций

$$\varepsilon = \frac{(l_k - l_0)}{l_1}, \quad (7)$$

где l_k, l_0 – приведенные длины интервалов между реперами из последующего (K -го) и начального наблюдений.

Скорость смещения реперов вычисляем по формуле:

$$V = b/\Delta T, \quad (8)$$

где b – полный вектор смещения репера за период наблюдения, м; ΔT – интервал времени наблюдения, сутки.

По полученным результатам величин η , i , $K(R)$ и ε строим для всех профильных линий наблюдательной станции графики вертикальных и горизонтальных деформаций. Для удобства и наглядности изображения масштабы подбираются индивидуально для каждого графика сдвигов, горизонтальных деформаций, вертикальных и горизонтальных смещений. В этом случае масштаб расстояний между реперами принимается таким же, как и на вертикальных разрезах.

На графики вертикальных и горизонтальных смещений наносятся границы возможных погрешностей их определения, особенно для случаев небольших смещений реперов, с целью правильной интерпретации полученных величин.

Величину деформаций при различных расстояниях между реперами для определения участков с сосредоточенными деформациями в виде трещин, ступеней и уступов, размеры которых еще невелики и визуально не прослеживаются, вычисляем по формулам (9–14):

$$e_T = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)l_1(l_1 + l_2)}{l_2}, \quad (9)$$

$$i_{\phi(c)} = \frac{i_2(l_1 + l_2) - i_1l_2}{l_2}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{\varepsilon_2(l_1 + l_2) - \varepsilon_1l_2}{l_2}, \quad (11)$$

$$h_y = \frac{(i_2 - i_1)l_1(l_1 + l_2)}{l_2}, \quad (12)$$

$$h_c = \frac{(i_1 - i_2)l_1(l_1 + l_2)}{l_2}, \quad (13)$$

$$i_{\phi(y)} = \frac{i_2(l_1 + l_2) - i_1l_2}{l_2}, \quad (14)$$

где e_m , h_c и h_y – вероятная ширина трещин, высота ступеней и уступов, которые образовались на наблюдаемом участке земной поверхности; ε_ϕ , $i_{\phi(c)}$ и $i_{\phi(y)}$ – фактические горизонтальные деформации и наклоны кривой мульды сдвижения на участках между трещинами, ступенями и уступами; ε_1 и i_1 – горизонтальные деформации и наклоны, полученные в результате измерений, при расстоянии между реперами l_1 ; ε_2 и i_2 – горизонтальные деформации и наклоны, вычисленные при расстояниях между реперами $l_1 + l_2$.

В начальный период наблюдений возникновение смещений массива и земной поверхности устанавливаем проверкой неравенства:

$$b > tm_s, \quad (15)$$

где b – величина смещения, полученная из наблюдений, м; t – коэффициент кратности для перехода от средней квадратической погрешности к границам доверительного интервала, который принимают равным 2,5–3,0; m_s – погрешность определения вектора смещения, м.

Выполнение вышеуказанных условий с большой вероятностью (0,98) указывают на смещение объекта наблюдений. Оценка относительных деформаций интервалов между реперами, за которыми ведется наблюдение, также может быть использована при наблюдении за профильными линиями. О наличии смещений может свидетельствовать величина растяжения в двух сериях наблюдений между двумя-тремя реперами на ≥ 10 мм при условии, что на соседних интервалах с ними нет сжатий.

3.3. Результаты исследований

3.3.1. Анализ и обработка данных метода сейсмического просвечивания

Значения скоростей упругих волн каждого исследуемого луча были определены благодаря оценки исходных данных сейсмического просвечивания, т. е. пары источник – приёмник. На рисунках 18–20 приведены распределения скоростей продольных и поперечных волн переходной зоны под дном карьера за три года исследований.

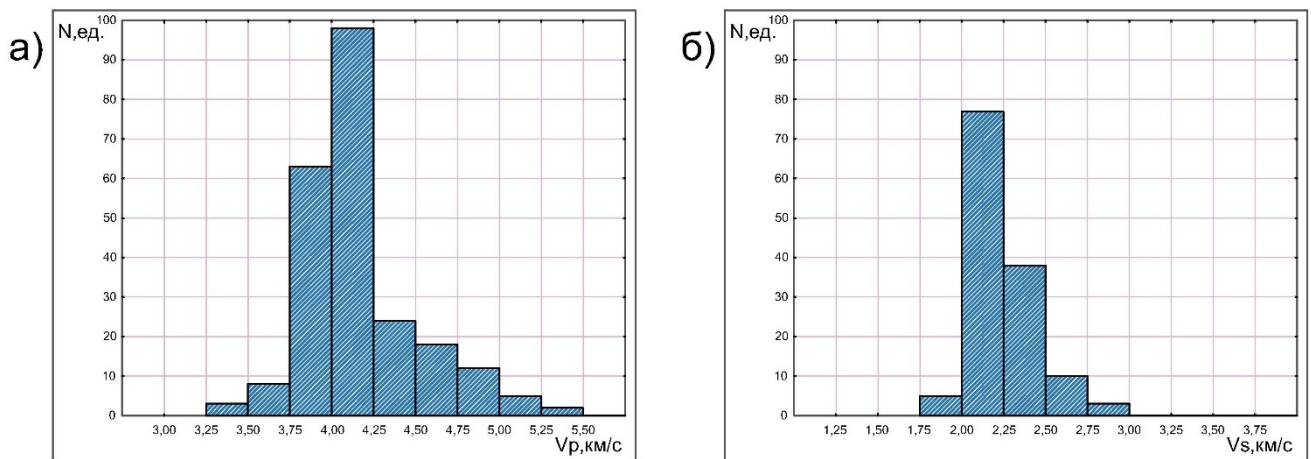


Рисунок 18. Распределение скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн по данным за первый год исследования

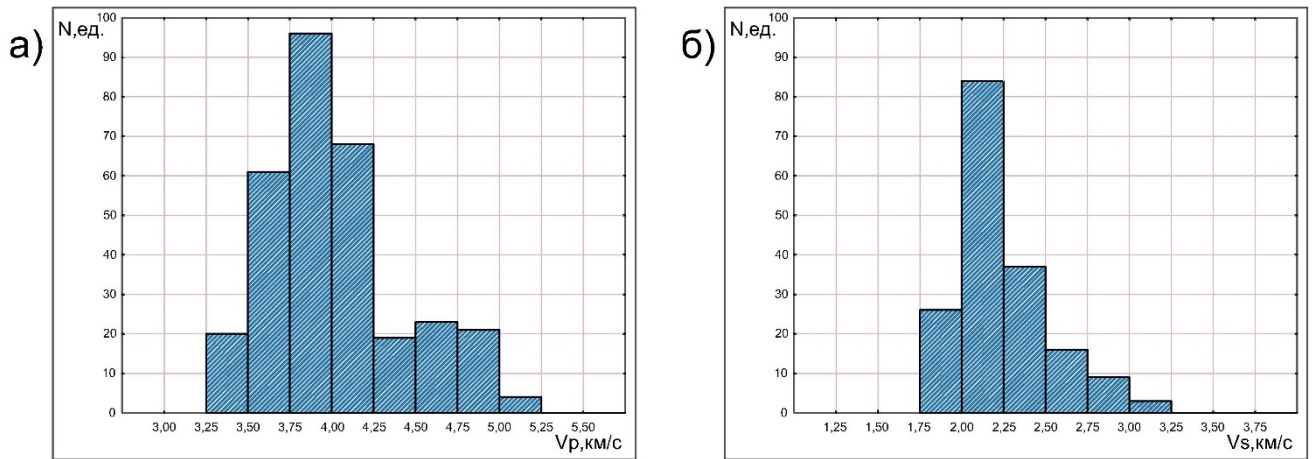


Рисунок 19. Распределение скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн по данным за второй год исследования

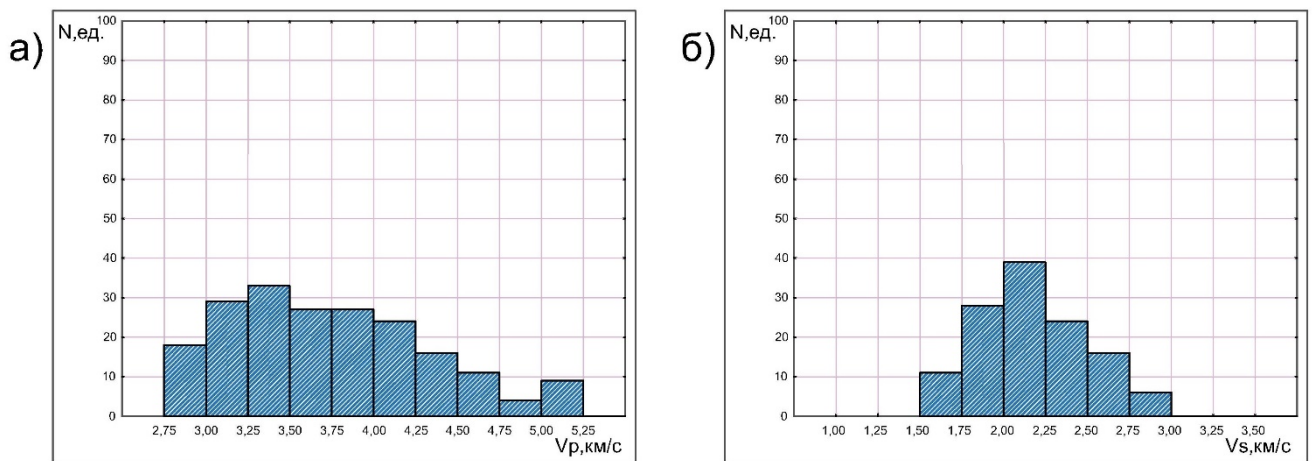


Рисунок 20. Распределение скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн по данным за третий год исследования

В таблицах 2 и 3 представлены сводные результаты по скоростям продольных и поперечных волн за три года исследований.

Таблица 2. Скорости продольных волн (V_p , км/с) за три года

№, год	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость V_p , км/с			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
Первый	233	4,17	3,35	5,32	0,33
Второй	312	4,02	3,28	5,15	0,39
Третий	198	3,75	2,85	5,16	0,52

Таблица 3. Скорости поперечных волн (V_s , км/с) за три года

№, год	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость V_s , км/с			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
Первый	133	2,37	1,82	2,98	0,32
Второй	175	2,29	1,76	3,03	0,30
Третий	124	2,14	1,66	2,92	0,38

Как видно из таблицы, наблюдается устойчивый тренд снижения значений скоростей продольных и поперечных волн, процентное изменение которых за каждый из периодов измерений уменьшалось практически одинаково. Разница между первым и вторым годом составила более 3%, между вторым и третьим годом – более 6%, а за весь период измерений значения скоростей волн упали почти на 10%. Также значительно возросло стандартное отклонение, которое указывает на неоднородность упругих свойств кимберлитов переходной зоны.

Максимальные значения скоростей в таблице соответствуют долеритам и галитам при малых базах просвечивания.

Разрешающая способность и точность метода реконструктивной томографии при выявлении скоростной неоднородности среды имеет прямую зависимость от плотности покрытия исследуемого массива лучевыми скоростями. По итогу проведенных исследований получено, что плотность покрытия лучевыми скоростями поперечных волн не обеспечивает необходимую степень детализации томографической карты. Выделенные поперечные волны сосредоточены в центральной части просвечиваемого массива, что не позволяет рассчитать томографическую карту для всей его площади. Однако скорости поперечных волн используются для расчета коэффициента Пуассона. Полученные значения коэффициента Пуассона соответствуют его табличным значениям в соответствии с отчетом АК «АЛРОСА» «Исходная горно-геологическая и техническая информация по руднику “Мир”». В дальнейшем, с учетом рассчитанного коэффициента Пуассона, рассчитываются значения динамического модуля упругости.

Изменение скорости упругих волн, которые четко реагируют на изменения физико-механических свойств горных пород, более чем на 8–10% считается аномальным, что свидетельствует об изменении свойств горных пород наблюдаемой области [69]. Значения скоростей ниже средних на 10% ($V_p < 3,5$ км/с) приняты за аномальные и характеризующие возможные области трещиноватости массива.

Лучевые скорости позволяют построить карты скоростного строения массива горных пород переходной зоны методом реконструкции сейсмической томографии.

Томографические карты распределения скоростей продольных волн в переходной зоне под дном карьера за три года исследований представлены на рисунках 21–23.

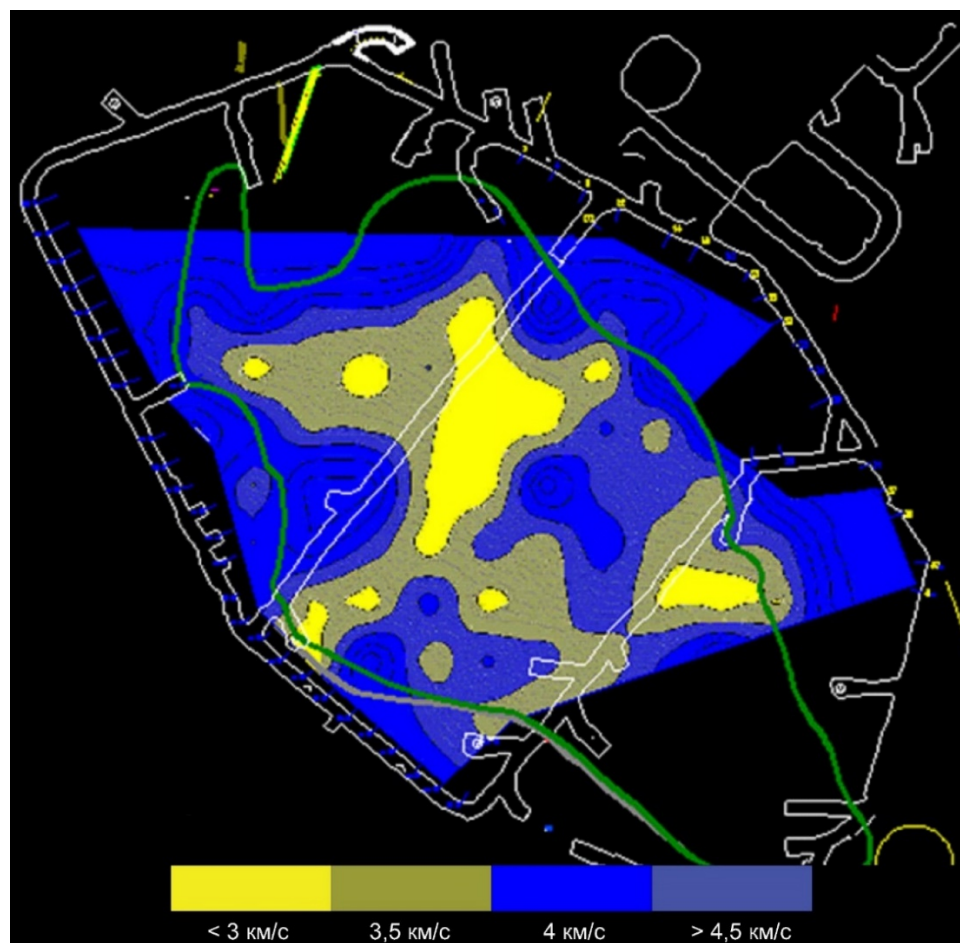


Рисунок 21. Результаты сейсмической томографии переходной зоны за первый год исследования

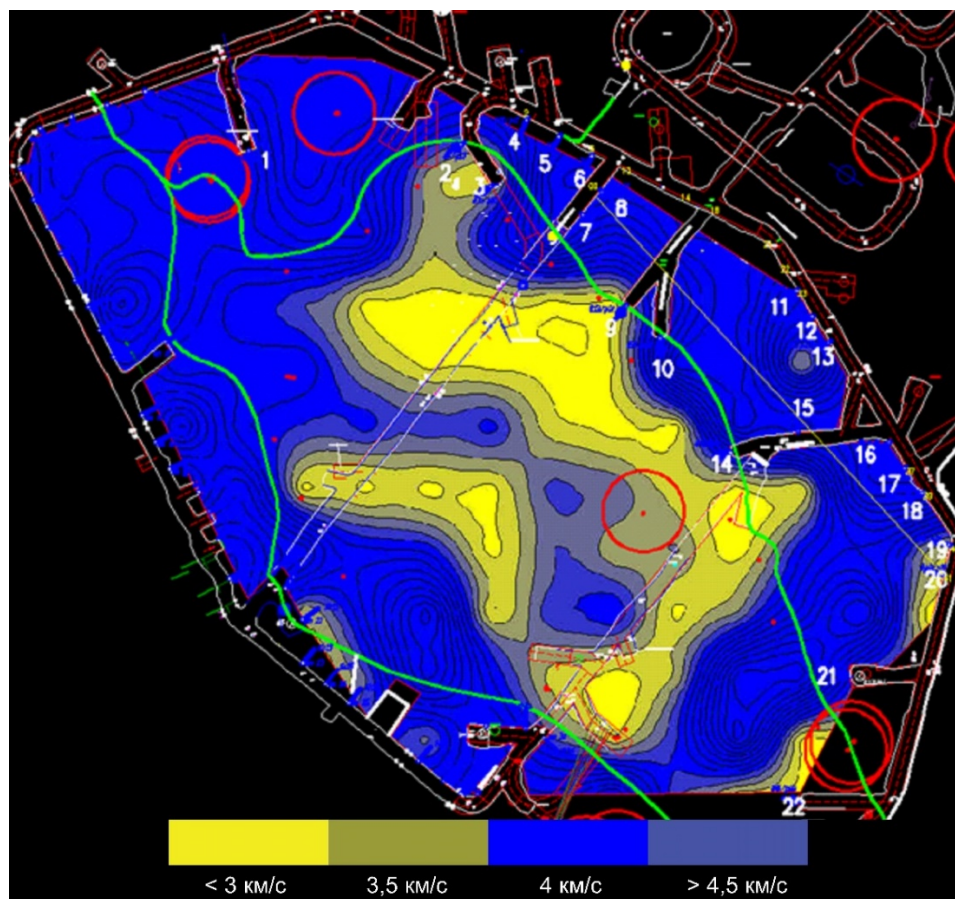


Рисунок 22. Результаты сейсмической томографии переходной зоны за второй год исследования

По представленным результатам топографических исследований можно выделить зоны вторичной терциноватости, образующиеся в центральной части рассматриваемого слоя массива горных пород, которые характеризуются аномальными скоростями продольных волн, что обозначено градиентом желтого цвета.

По результатам первого и второго года исследований наблюдается перераспределение низкоскоростных зон, сопровождающееся изменением их форм, что, возможно, связано с нагнетанием тампонажных растворов. Полученные данные состояния переходной зоны за первые два года исследований не позволяют говорить о высокой эффективности применения тампонажа.

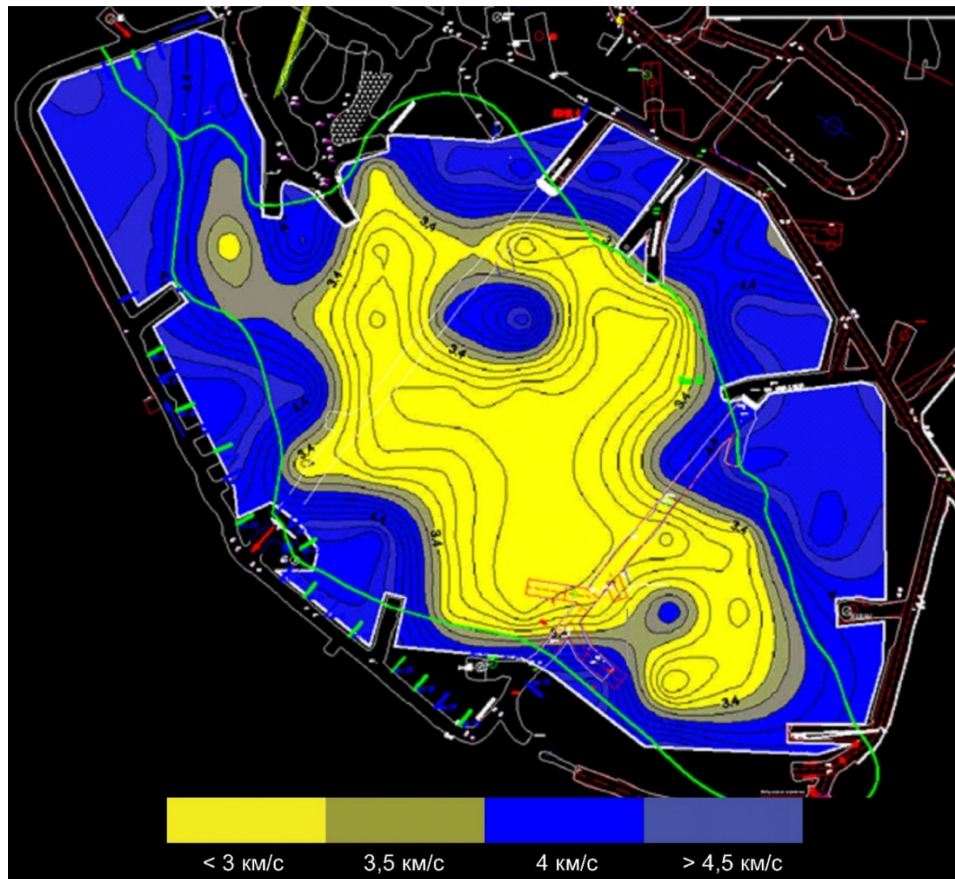


Рисунок 23. Результаты сейсмической томографии переходной зоны за третий год исследования

Результаты статистической и томографической обработки сейсмического просвечивания указывают на значительное снижение упругих свойств массива и его ослабление в целом. В первый и второй год наблюдалось перераспределение области пониженных скоростей (оттенки желтого), также происходит незначительное увеличение их площади. На полученной томографической карте за третий год исследований виден рост площади низкоскоростной области, развивающийся в направлении к оконтуривающим выработкам от центра рудного тела. Также за весь период наблюдений зафиксировано увеличение размеров области разрушения кимберлитов в переходной зоне под дном карьера на 86%.

Проведенный расчет динамического модуля упругости на основе скоростей упругих волн и принимаемой плотности кимберлитов $2,5 \text{ т/м}^3$ показывает также общее снижение показателя. На рисунках 24–26 представлены статистические распределения значений динамического модуля упругости за три года исследования.

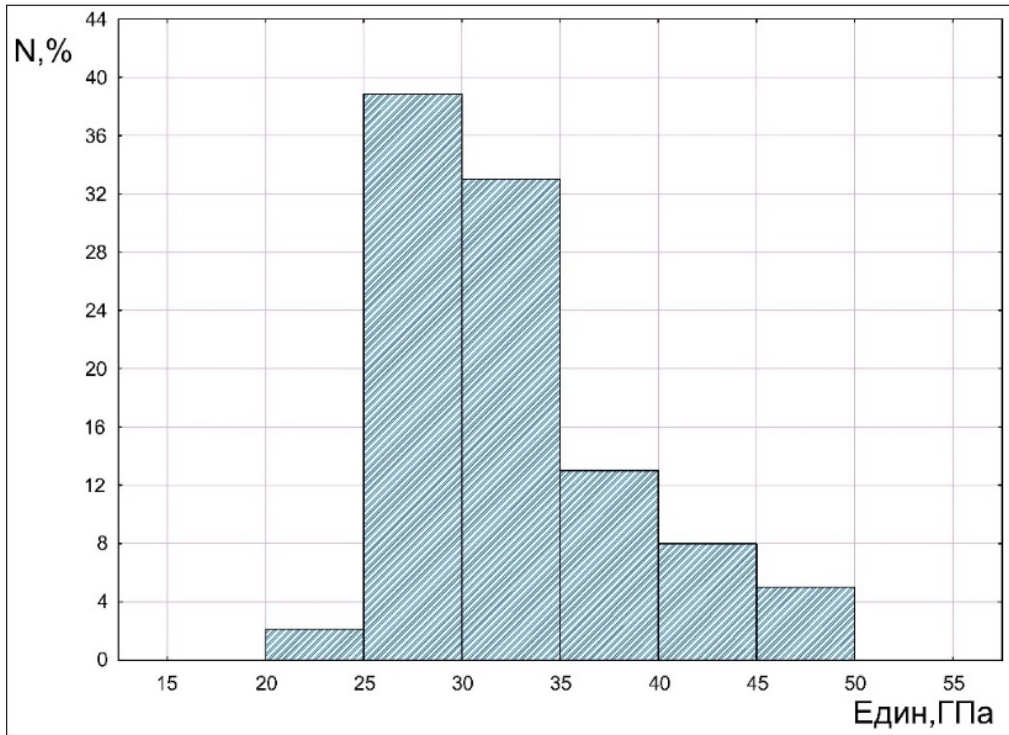


Рисунок 24. Распределение динамического модуля упругости по данным за первый год

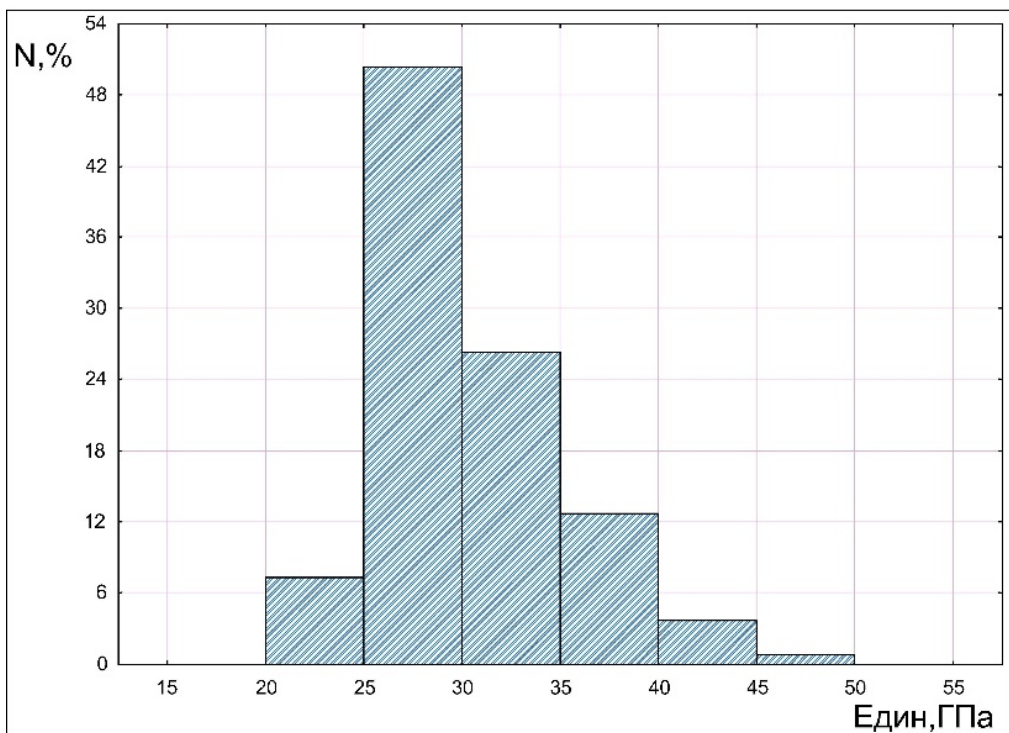


Рисунок 25. Распределение динамического модуля упругости по данным за второй год

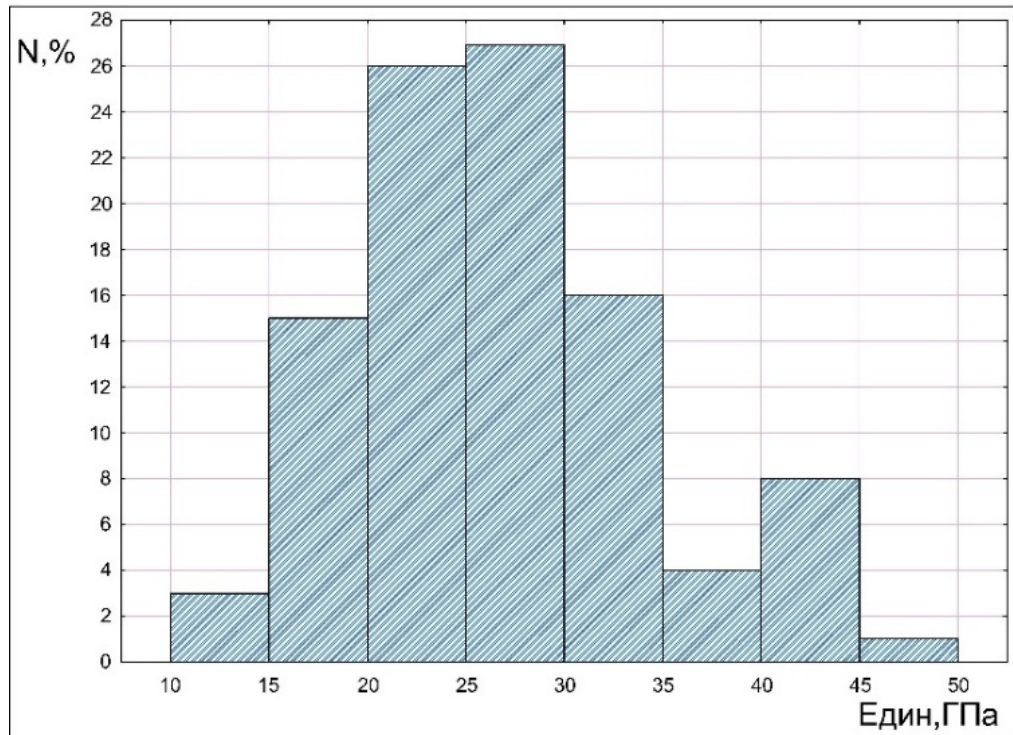


Рисунок 26. Распределение динамического модуля упругости по данным за третий год

Рассчитанные значения динамического модуля упругости ($E_{\text{дин}}$, ГПа) приведены в таблице 4.

Таблица 4. Статистические параметры $E_{\text{дин}}$ (ГПа)

№, год	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость $E_{\text{дин}}$, ГПа			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
Первый	124	32.1	22.2	48.4	4.3
Второй	168	30.3	20.9	47.6	4.7
Третий	115	26.9	14.1	45.8	7.6

Уменьшение $E_{\text{дин}}$ между первым и вторым годами составило $\sim 5,6\%$, между вторым и третьим годами $\sim 11,2\%$. За весь период наблюдений значения динамического модуля упругости упали более чем на 16%.

3.3.1.1. Основные результаты метода сейсмического просвечивания

Как видно из таблицы 3, а также это указывалось в предыдущих циклах наблюдений, изменения значений скоростей упругих волн составляют 3–6% в год. Данный цикл наблюдений подтвердил этот факт, и в третьем году физико-механические свойства и состояние переходной зоны уменьшилось, по отношению к первому году наблюдений, на 10% и более.

Томографическая карта изолиний скоростей, полученная за третий год, указывает на значительное снижение упругих свойств кимберлитов переходной зоны. Карты распределения скоростей характеризуют области повышенной трещиноватости и фильтрации.

По сводным результатам таблицы 4 видно, что в первый год измерений среднее значение динамического модуля упругости равно 32,1 ГПа при распределении данного показателя в интервале $\sim 20 \div 50$ ГПа. Полученные результаты соответствуют значениям, рассчитанным в нетронутом рудном массиве и представленным в отчете АК «АЛРОСА» «Исходная горно-геологическая и техническая информация по руднику “Мир”», где среднее значение колеблется от 29,8 до 35,4 ГПа [105]. На третий год уменьшение $E_{\text{дин}}$ составило более 16% в сравнении с первым годом. Данное отличие является дополнительным подтверждением горизонтально слоистого (трещиноватого), сильно нарушенного строения массива горных пород переходной зоны [106].

Геофизические методы исследований являются косвенными, т. е. основаны на зависимостях физико-механических свойств и состояния массива горных пород с геофизическими полями, на основе которых и делается количественная и качественная оценка.

3.3.2. Анализ и обработка данных метода ультразвукового каротажа

Исследование методом УЗК было выполнено в первый год. Измерения проводились на горизонтах:

- 1) –210 в двух скважинах (28,2 м),
- 2) –265 в двух скважинах (38,2 м),

3) –310 в двух скважинах (68,1 м).

В нормальных условиях, т. е. ниже уровня воды, уверенно регистрировались продольные (P) и поперечные (S) волны.

Результаты ультразвукового каротажа представлены в виде каротажных диаграмм, на которых приведены первичные (на интервале измерений 0,1 м) кривые изменения V_p , V_s (рис. 27). При рассмотрении диаграмм отмечается сильная изрезанность графиков скорости продольных волн на интервале 0,2–0,4 м, что может свидетельствовать о горизонтальной слоистости (трещиноватости) рудного массива.

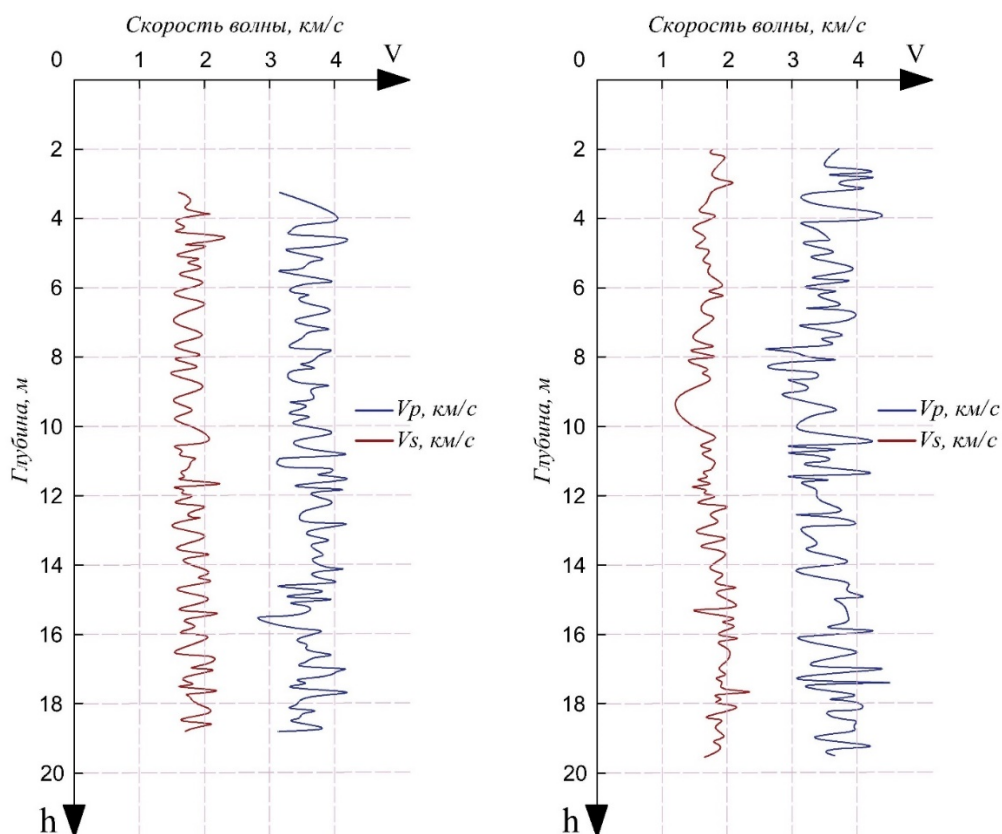


Рисунок 27. Каротажные диаграммы по данным УЗК (гор. –265 скв. 1, скв. 2)

Ни одна из скважин не подсекла значительных трещин (интенсивно трещиноватых областей).

В таблицах 5 и 6 представлены результаты расчётов скоростей продольных и поперечных волн по скважинам УЗК.

Таблица 5. Скорости продольных волн (V_p , км/с) по скважинам

Горизонт	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость V_p , км/с			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
- 210 скв.1	93	3.90	3.06	5.17	0.53
- 210 скв.2	54	3.20	2.59	4.00	0.39
- 265 скв.1	134	3.36	2.80	4.20	0.28
- 265 скв.2	123	3.52	2.59	4.48	0.39
- 310 скв.1-1	87	3.34	2.64	4.13	0.35
- 310 скв. 1-2	124	3.41	2.52	4.41	0.36
- 310 скв.2-1	116	3.87	3.06	4.80	0.40

Таблица 6. Скорости продольных волн (V_s , км/с) по скважинам

Горизонт	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость V_s , км/с			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
- 210 скв.1	53	2.14	1.66	2.64	0.37
- 210 скв.2	32	1.69	1.31	2.18	0.30
- 265 скв.1	64	1.71	1.49	2.31	0.17
- 265 скв.2	62	1.80	1.29	2.33	0.41
- 310 скв.1-1	54	1.91	1.66	2.39	0.20
- 310 скв. 1-2	57	1.93	1.71	2.53	0.17
- 310 скв.2-1	61	2.16	1.68	2.92	0.39

В таблицах 7 и 8 представлены обобщения скоростей продольных и поперечных волн по горизонтам по данным УЗК.

Таблица 7. Скорости продольных волн (V_p , км/с) по горизонтам

Горизонт	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость V_p , км/с			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
- 210	147	3.20	2.59	4.00	0.39
- 265	257	3.43	2.59	4.48	0.34
- 310	327	3.55	2.52	4.80	0.44

Таблица 8. Скорости поперечных волн (V_s , км/с) по горизонтам

Горизонт	Кол-во. изм., N, ед.	Скорость V_s , км/с			Сред.кв.откл. δ , км/с
		Сред.	Мин.	Макс.	
- 210	85	1.92	1.31	2.64	0.21
- 265	126	1.76	1.29	2.33	0.18
- 310	172	2.00	1.66	2.92	0.22

3.3.2.1. Основные результаты метода ультразвукового каротажа

По данным акустического каротажа эффект цементации не прослеживается:

1. Ожидаемый результат цементации должен был оказать существенное влияние на величину скоростей упругих волн и эффективного коэффициента затухания, величина эффективного коэффициента затухания должна была понизиться минимум на порядок, скорости – возрасти до уровня скоростей в относительно сохранных известняках.

2. Визуальное наблюдение излива контрольных скважин с выносом мелкодисперсной фракции может свидетельствовать о наличии питающих трещин.

3.3.2.2. Анализ и обработка полученных данных инклинометрических исследований

Наблюдения на станции были проведены после начала ведения горных работ.

В результате проведения инклинометрических измерений на наблюдательной станции, заложенной в кровле выработки, не было зафиксировано значимых горизонтальных и вертикальных перемещений деформационных реперов (величины смещений относительно малы и не превышают 10 мм). По отдельным реперам были зафиксированы смещения, величины которых составляют несколько сантиметров, но анализ этих величин показал, что они, скорее всего, вызваны либо ошибкой измерения, либо механическим повреждением репера. Учитывая то, что начало инструментальных наблюдений было проведено много позже начала очистных работ, оказывающих основное воздействие на подрабатываемый массив, можно предположить, что фиксируемые деформации являются остаточным явлением, развивающимся после активной стадии деформирования массива в данном районе.

Системой комплексного мониторинга были зафиксированы критические деформации. На инклинометрических скважинах зафиксированы максимальные оседания реперов следующих значений: скважина № 1 – 140 мм; скважина № 4 –

130 мм; скважина № 5 – 200 мм; скважина № 6 – 200 мм; скважина № 7 – 180 мм. Период (примерно полтора месяца) оседания переходной зоны составил 3,2% от мощности вынуженного слоя.

В таблицах 9, 10, 11 представлены примеры результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных сдвижений по скважине № 1, где один цикл измерений соответствует месячному интервалу наблюдений. В таблицах 12, 13, 14 представлены примеры обработки результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных деформаций по скважине № 1.

На рисунках 28 и 29 цветными кривыми показаны деформации профиля инклинометрической скважины № 1 по оседанию реперов за 9 месяцев наблюдений.

Таблица 9. Результаты оседания η , мм

Репер	4-й цикл	5-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
0	0	0	2	-34	-34
Rp 1	3	-1	-5	-34	-34
Rp 2	5	-8	-27	-41	-35
Rp 3	1	-17	-56	-53	-39
Rp 4	4	-17	-72	-55	-42
Rp 5	6	-23	-87	-58	-47
Rp 6	7	-29	-106	-68	-57
Rp 7	10	-32	-97	-49	-38
Rp 8	4	-53	-144		
Rp 9	5	-58	-138		
Rp 10	7	-64	-141		

Таблица 10. Результаты горизонтальных сдвижений ξ , мм

Репер	4-й цикл	5-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1	6	-2	0	2	-3
Rp 2	5	2	0	0	-2
Rp 3	7	1	0	5	-5
Rp 4	7	0	0	7	-4
Rp 5	9	1	4	3	-1
Rp 6	8	3	-4	11	-2
Rp 7	7	2	-1	16	-14
Rp 8	0	-1	-8	14	-13
Rp 9	5	-4	-5	10	-11
Rp 10	5	-2	-5	4	-1

Таблица 11. Результаты расстояний между реперами I, мм

Интервал	1-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	4999	4998	5002	5002	5000	5001
Rp 2 – Rp 3	4998	5000	4999	4999	5004	5001
Rp 3 – Rp 4	4998	4998	4997	4997	4999	5000
Rp 4 – Rp 5	5003	5005	5006	5010	5006	5009
Rp 5 – Rp 6	4998	4997	4999	4991	4999	4998
Rp 6 – Rp 7	4998	4997	4996	4999	5004	4992
Rp 7 – Rp 8	5000	4993	4990	4983	4981	4982
Rp 8 – Rp 9	4991	4996	4993	4996	4992	4994
Rp 9 – Rp 10	5002	5002	5004	5004	4998	5008

Таблица 12. Наклоны I, $\times 10^{-3}$

Интервал	4-й цикл	5-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	-0,4	1,3	4,4	1,5	0,1
Rp 2 – Rp 3	0,7	1,9	5,9	2,4	0,9
Rp 3 – Rp 4	-0,7	0	3,1	0,4	0,6
Rp 4 – Rp 5	-0,4	1,1	3,2	0,5	1
Rp 5 – Rp 6	-0,1	1,1	3,7	2	2
Rp 6 – Rp 7	-0,7	0,6	-1,7	-3,6	-3,7
Rp 7 – Rp 8	1,3	4,2	9,4	-9,9	-7,7
Rp 8 – Rp 9	-0,2	1,1	-1,3	0	0
Rp 9 – Rp 10	-0,4	1	0,6	0	0

Таблица 13. Кривизна K, 1/м

Репер	4-й цикл	5-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Rp 3	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	0
Rp 4	0	0,1	0	0	0
Rp 5	0	0	0,1	0,1	0,1
Rp 6	-0,1	0	-0,5	-0,6	-0,6
Rp 7	0,2	0,4	1,1	-0,6	-0,4
Rp 8	-0,2	-0,3	-1,1	1	0,8
Rp 9	0	0	0,2	0	0

Таблица 14. Горизонтальные деформации ε , $\times 10^{-3}$

Интервал	4-й цикл	5-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	-0,2	0,8	0	-0,4	0,2
Rp 2 – Rp 3	0,4	-0,2	0	1	-0,6
Rp 3 – Rp 4	0	-0,2	0	0,4	0,2
Rp 4 – Rp 5	0,4	0,2	0,8	-0,8	0,6
Rp 5 – Rp 6	-0,2	0,4	-1,6	1,6	-0,2
Rp 6 – Rp 7	-0,2	-0,2	0,6	1	-2,4
Rp 7 – Rp 8	-1,4	-0,6	-1,4	-0,4	0,2
Rp 8 – Rp 9	1	-0,6	0,6	-0,8	0,4
Rp 9 – Rp 10	0	0,4	0	-1,2	2

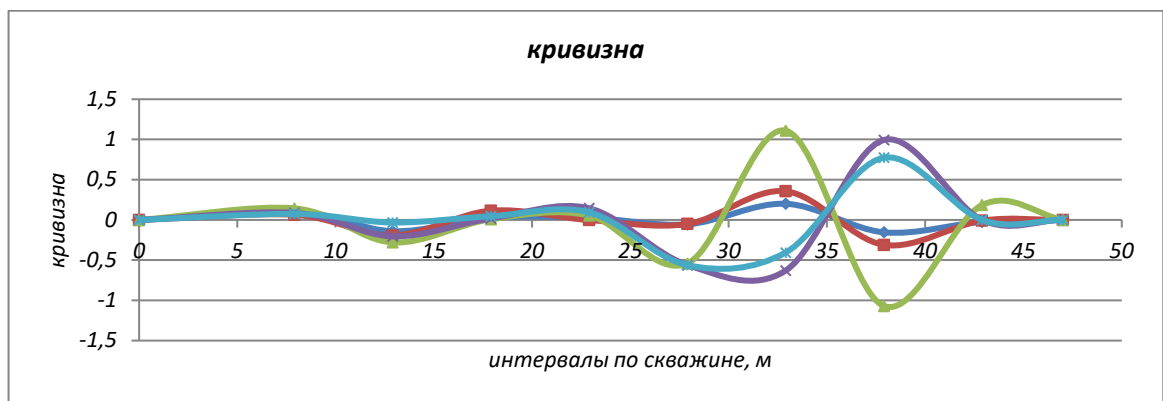
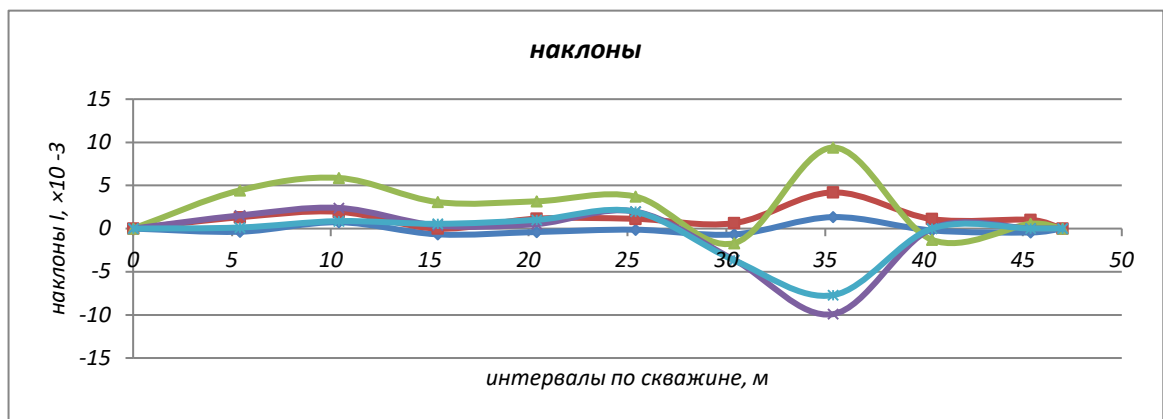
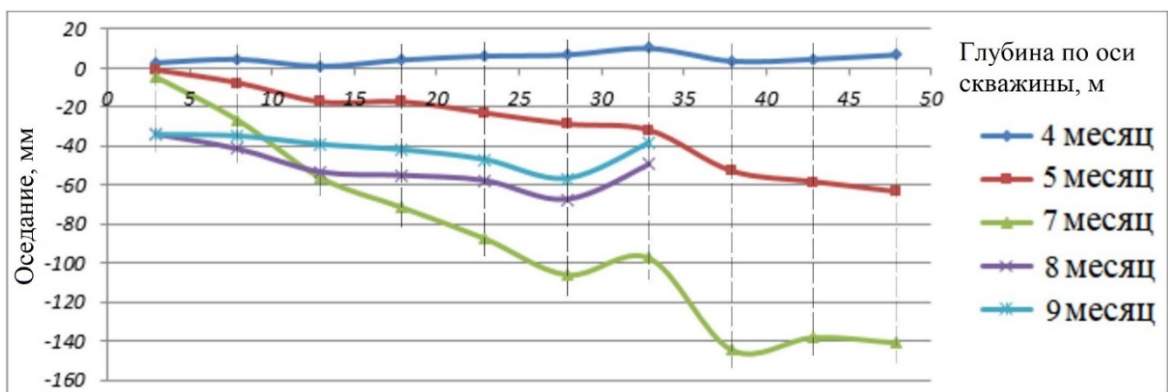


Рисунок 28. Вертикальные сдвигения и вертикальные деформации скважины № 1

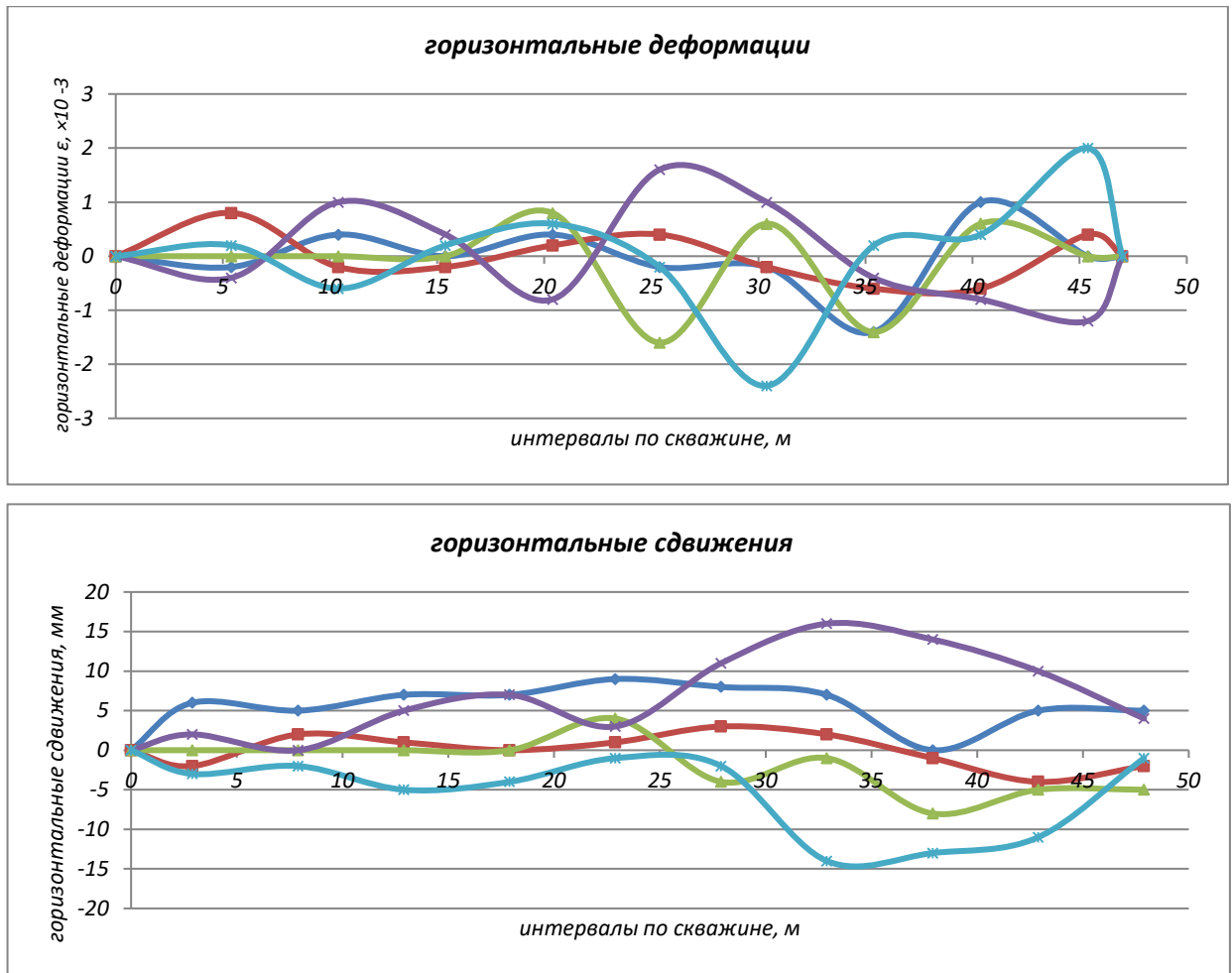


Рисунок 29. Горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации скважины № 1

В таблицах 15, 16, 17 представлены примеры результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных сдвижений по скважине № 4.

Таблица 15. Результаты оседания η , мм

Репер	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
0	1	-13	-23	-22	-22	-54
Rp 1	4	7	-12	-19	-20	-52
Rp 2	7	8	-14	-14	-22	-57
Rp 3	3	3	-22	-13	-30	-66
Rp 4	-6	-7	-35	-22	-42	-79
Rp 5	-2	-3	-34	-14	-39	-75
Rp 6	-13	-20	-53	-21	-51	-87
Rp 7	10	-1	-30	8	-29	-64
Rp 8	13	2	-27	17	-25	-59
Rp 9	24	11	-16	38	-14	-48

Таблица 16. Результаты горизонтальных сдвижений ξ , мм

Репер	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1	4	-3	0	2	-1	4
Rp 2	4	0	0	0	3	35
Rp 3	5	1	1	-2	-2	12
Rp 4	3	-2	0	3	0	1
Rp 5	3	-2	0	-8	11	7
Rp 6	0	-4	0	3	0	21
Rp 7	-8	-3	0	3	-4	-5
Rp 8	-9	-4	-2	4	-1	-173
Rp 9	-6	-6	-1	5	-3	-165

Таблица 17. Результаты расстояний между реперами l, мм

Интервал	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1 – Rp 2	5002	5002	5005	5005	5003	5007	5038
Rp 2 – Rp 3	4998	4999	5000	5001	4999	4994	4971
Rp 3 – Rp 4	5000	4998	4995	4994	4999	5001	4990
Rp 4 – Rp 5	5000	5000	5000	5000	4989	5000	5006
Rp 5 – Rp 6	5991	5988	5986	5986	5997	5986	6000
Rp 6 – Rp 7	7994	7986	7987	7987	7987	7983	7957
Rp 7 – Rp 8	4991	4990	4989	4987	4988	4991	4823
Rp 8 – Rp 9	4996	4999	4997	4998	4999	4997	5005

В таблицах 18, 19, 20 представлены примеры обработки результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных деформаций по скважине № 4.

Таблица 18. Наклоны I, $\times 10^{-3}$

Интервал	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1 – Rp 2	-0,4	-0,1	0,4	-1,0	0,3	1,0
Rp 2 – Rp 3	0,7	1,0	1,6	-0,1	1,7	1,9
Rp 3 – Rp 4	1,9	1,9	2,6	1,8	2,4	2,5
Rp 4 – Rp 5	-0,7	-0,7	-0,3	-1,7	-0,7	-0,7
Rp 5 – Rp 6	1,7	2,8	3,1	1,2	2,1	2,0
Rp 6 – Rp 7	-2,9	-2,4	-2,8	-3,7	-2,8	-2,8
Rp 7 – Rp 8	-0,6	-0,6	-0,6	-1,8	-0,8	-1,1
Rp 8 – Rp 9	-2,1	-1,7	-2,1	-4,1	-2,1	-2,2

Таблица 19. Кривизна K , $1/m$

Репер	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Rp 3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Rp 4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3
Rp 5	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Rp 6	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3
Rp 7	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
Rp 8	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1

Таблица 20. Горизонтальные деформации ϵ , $\times 10^{-3}$

Интервал	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1 – Rp 2	0,0	0,6	0,0	-0,4	0,8	6,2
Rp 2 – Rp 3	0,2	0,2	0,2	-0,4	-1,0	-4,6
Rp 3 – Rp 4	-0,4	-0,6	-0,2	1,0	0,4	-2,2
Rp 4 – Rp 5	0,0	0,0	0,0	-2,2	2,2	1,2
Rp 5 – Rp 6	-0,5	-0,3	0,0	1,8	-1,8	2,3
Rp 6 – Rp 7	-1,0	0,1	0,0	0,0	-0,5	-3,3
Rp 7 – Rp 8	-0,2	-0,2	-0,4	0,2	0,6	-33,7
Rp 8 – Rp 9	0,6	-0,4	0,2	0,2	-0,4	1,6

На рисунках 30 и 31 представлены примеры сдвижений и деформаций по скважине № 4, где один цикл измерений соответствует месячному интервалу наблюдений.

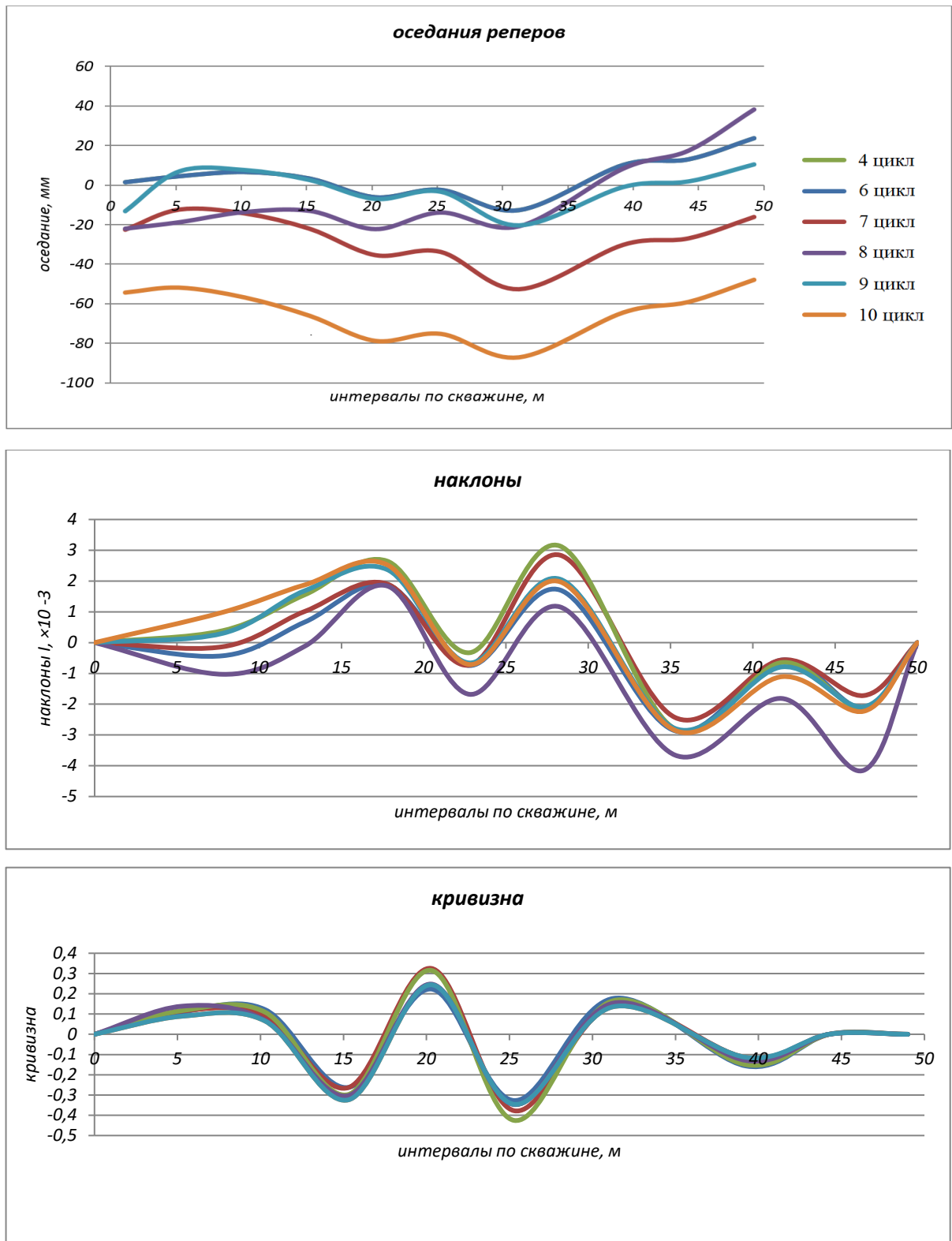


Рисунок 30. Вертикальные сдвиги и вертикальные деформации скважины № 4

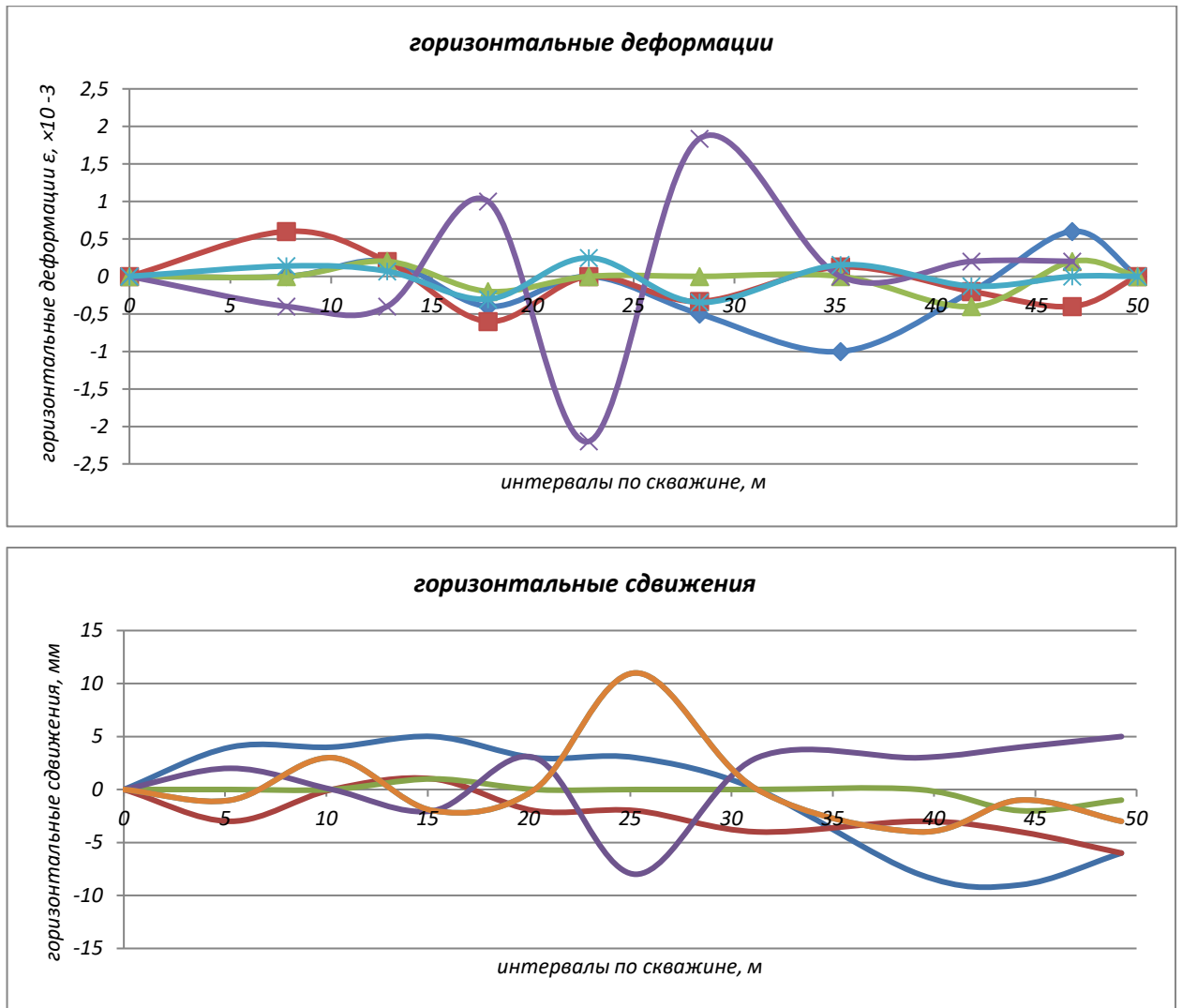


Рисунок 31. Горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации скважины № 4

В таблицах 21, 22, 23 представлены примеры результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных сдвижений по скважине № 5.

Таблица 21. Результаты оседания η , мм

Репер	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	9-й цикл
0	0	0	0	-19	-26
Rp 1	0	-3	-3	-22	-31
Rp 2	-2	-5	-11	-26	-38
Rp 3	-4	-10	-15	-31	-46
Rp 4	-6	-15	-23	-37	-55
Rp 5	-7	-16	-25	-42	-60
Rp 6	-6	-15	-27	-45	-62
Rp 7	-6	-17	-37	-53	-69
Rp 8	-6	-17	-46		
Rp 9	-9	-28	-66		
Rp 10	-22	-48	-88		

Таблица 22. Результаты горизонтальных сдвижений ξ , мм

Репер	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	9-й цикл
Rp 1	5	2	0	1	-2
Rp 2	3	6	-1	3	-1
Rp 3	3	5	0	2	-2
Rp 4	4	5	-1	2	1
Rp 5	1	5	-2	4	-1
Rp 6	0	6	-4	3	5
Rp 7	0	7	-4	4	2
Rp 8	4	6	-2	6	-2
Rp 9	2	2	-4	4	4
Rp 10	-3	0	-5	2	3

Таблица 23. Результаты расстояний между реперами l, мм

Интервал	0-й цикл	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	5004	5002	5006	5005	5007	5008
Rp 2 – Rp 3	4997	4997	4996	4997	4996	4995
Rp 3 – Rp 4	4997	4998	4998	4997	4997	5000
Rp 4 – Rp 5	5001	4998	4998	4997	4999	4997
Rp 5 – Rp 6	5000	4999	5000	4998	4997	5003
Rp 6 – Rp 7	4997	4997	4998	4998	4999	4996
Rp 7 – Rp 8	4993	4997	4996	4998	5000	4996
Rp 8 – Rp 9	4999	4997	4993	4991	4989	4995
Rp 9 – Rp 10	4996	4991	4989	4988	4986	4985

В таблицах 24, 25, 26 представлены примеры обработки результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных деформаций по скважине № 5.

Таблица 24. Наклоны I, $\times 10^{-3}$

Интервал	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	0,3	0,5	1,5	0,8	1,4
Rp 2 – Rp 3	0,3	0,9	0,9	1,0	1,6
Rp 3 – Rp 4	0,4	1,0	1,6	1,2	1,8
Rp 4 – Rp 5	0,3	0,3	0,5	0,9	1,1
Rp 5 – Rp 6	-0,1	-0,3	0,3	0,6	0,4
Rp 6 – Rp 7	-0,2	0,5	2,1	1,6	1,4
Rp 7 – Rp 8	0,2	0,0	1,7	0,0	0,0
Rp 8 – Rp 9	0,6	2,3	4,1		
Rp 9 – Rp 10	2,4	4,0	4,3		

Таблица 25. Кривизна K, 1/м

Репер	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	9-й цикл
Rp 2	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
Rp 3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Rp 4	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
Rp 5	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1
Rp 6	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
Rp 7	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,1
Rp 8	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0
Rp 9	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0

Таблица 26. Горизонтальные деформации ϵ , $\times 10^{-3}$

Интервал	1-й цикл	4-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	-0,4	0,8	-0,2	0,4	0,2
Rp 2 – Rp 3	0,0	-0,2	0,2	-0,2	-0,2
Rp 3 – Rp 4	0,2	0,0	-0,2	0,0	0,6
Rp 4 – Rp 5	-0,6	0,0	-0,2	0,4	-0,4
Rp 5 – Rp 6	-0,2	0,2	-0,4	-0,2	1,2
Rp 6 – Rp 7	0,0	0,2	0,0	0,2	-0,6
Rp 7 – Rp 8	0,8	-0,2	0,4	0,4	-0,8
Rp 8 – Rp 9	-0,4	-0,8	-0,4	-0,4	1,2
Rp 9 – Rp 10	-1,0	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2

На рисунках 32 и 33 представлены примеры сдвижений и деформаций по скважине № 5.

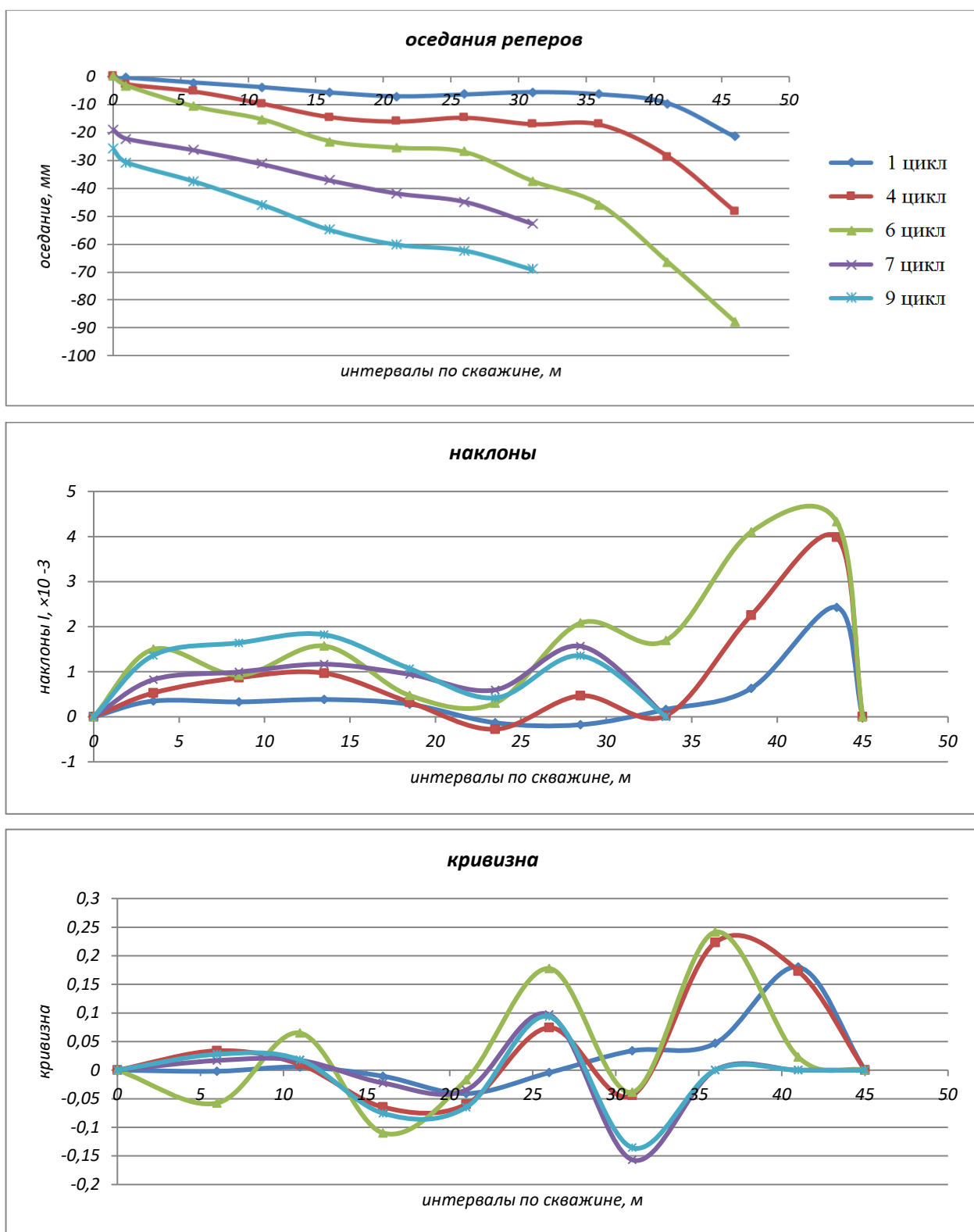


Рисунок 32. Вертикальные сдвижения и вертикальные деформации скважины № 5

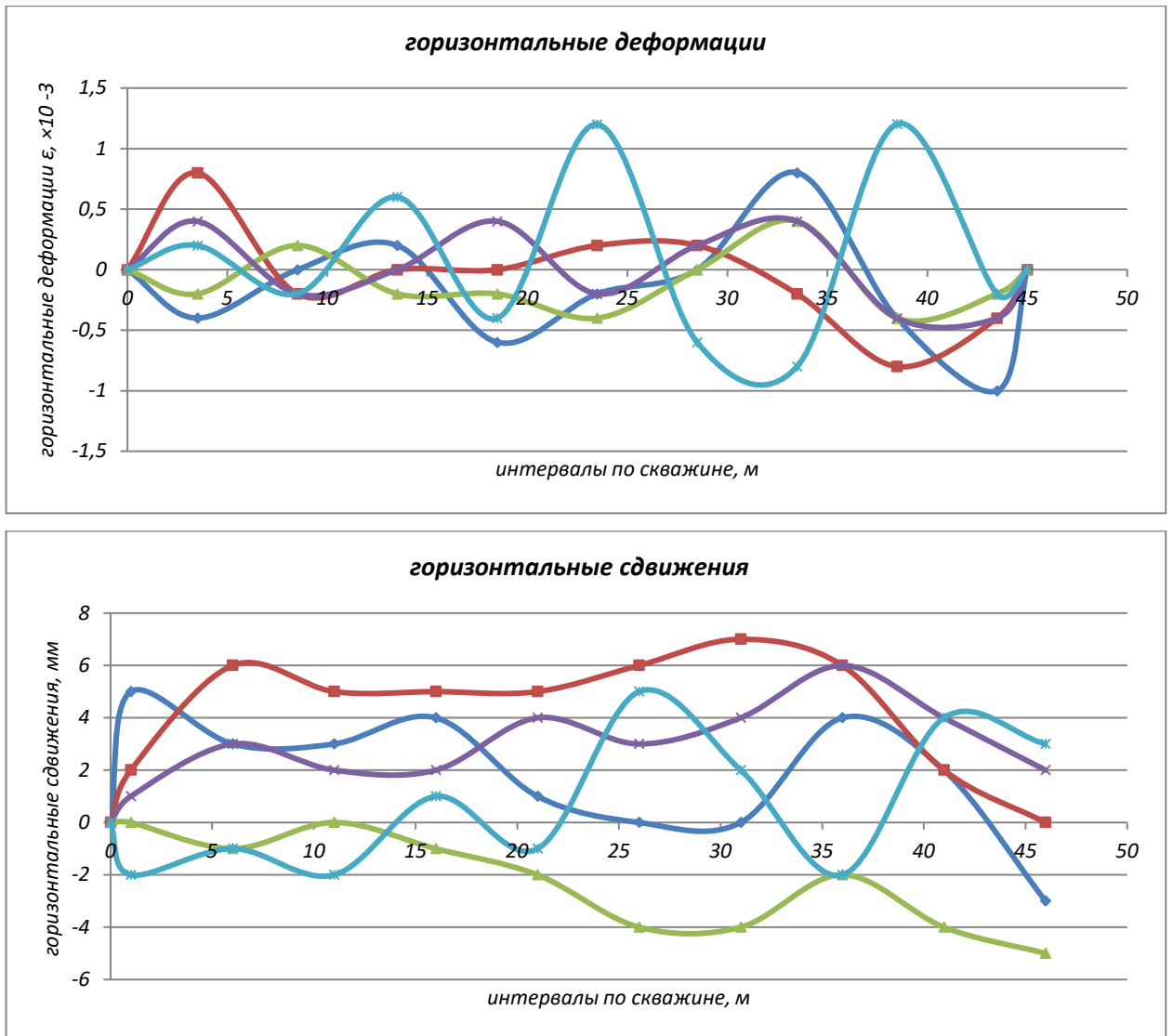


Рисунок 33. Горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации скважины № 5

В таблицах 27, 28, 29 представлены примеры результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных сдвижений по скважине № 6.

Таблица 27. Результаты оседания η , мм

Репер	2-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	12-й цикл
0	0	0	0	0	-33	-23
Rp 1	8	5	-6	-5	-64	-47
Rp 2	6	-2	-11	-11	-91	-76
Rp 3	3	-13	-16	-18	-109	-105
Rp 4	-12	-27	-29	-51	-125	-148
Rp 5	-37	-60	-65	-77	-174	
Rp 6	-62	-81	-86	-102	-196	
Rp 7	-86	-103	-108	-129	-220	
Rp 8	-109	-126	-133	-158	-245	
Rp 9	-130	-145	-152	-181	-262	
Rp 10	-151	-164	-173	-208	-284	

Таблица 28. Результаты горизонтальных сдвижений ξ , мм

Репер	2-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл
Rp 1	2	0	0	0	1
Rp 2	3	-1	2	0	5
Rp 3	3	0	3	-2	4
Rp 4	2	0	1	1	5
Rp 5	2	0	0	0	4
Rp 6	3	0	3	-2	-2
Rp 7	5	1	0	1	1
Rp 8	5	0	0	2	1
Rp 9	4	0	0	0	6
Rp 10	-1	0	0	3	0

Таблица 29. Результаты расстояний между реперами l, мм

Интервал	1-й цикл	2-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл
Rp 1 – Rp 2	4998	4999	4998	5000	5000	5004
Rp 2 – Rp 3	4999	4999	5000	5001	4999	4998
Rp 3 – Rp 4	5003	5002	5002	5000	5003	5004
Rp 4 – Rp 5	4999	4999	4999	4998	4997	4996
Rp 5 – Rp 6	4993	4994	4994	4997	4995	4989
Rp 6 – Rp 7	5001	5003	5004	5001	5004	5007
Rp 7 – Rp 8	4996	4996	4995	4995	4996	4996
Rp 8 – Rp 9	4999	4998	4998	4998	4996	5001
Rp 9 – Rp 10	5004	4999	4999	4999	5002	4996

В таблицах 30, 31, 32 представлены примеры обработки результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных деформаций по скважине № 6.

Таблица 30. Наклоны I, $\times 10^{-3}$

Интервал	2-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл
Rp 1 – Rp 2	0,4	1,5	1,1	1,2	5,4
Rp 2 – Rp 3	0,7	2,3	0,9	1,5	3,6
Rp 3 – Rp 4	2,9	2,7	2,6	6,5	3,3
Rp 4 – Rp 5	5,1	6,7	7,3	5,3	9,8
Rp 5 – Rp 6	5,0	4,1	4,2	5,0	4,4
Rp 6 – Rp 7	4,7	4,5	4,5	5,4	4,7
Rp 7 – Rp 8	4,8	4,7	4,9	5,8	5,0
Rp 8 – Rp 9	4,1	3,7	3,8	4,6	3,5
Rp 9 – Rp 10	4,2	3,8	4,3	5,5	4,3

Таблица 31. Кривизна K, 1/м

Репер	2-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл
Rp 2	0	0	0	0	0
Rp 3	0,0	0,1	0,0	0,0	-0,2
Rp 4	0,2	0,0	0,2	0,5	0,0
Rp 5	0,2	0,4	0,5	-0,1	0,6
Rp 6	0,0	-0,3	-0,3	0,0	-0,5
Rp 7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rp 8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rp 9	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
Rp 10	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1

Таблица 32. Горизонтальные деформации ϵ , $\times 10^{-3}$

Интервал	2-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл
Rp 1 – Rp 2	0,2	-0,2	0,4	0,0	0,8
Rp 2 – Rp 3	0,0	0,2	0,2	-0,4	-0,2
Rp 3 – Rp 4	-0,2	0,0	-0,4	0,6	0,2
Rp 4 – Rp 5	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,2
Rp 5 – Rp 6	0,2	0,0	0,6	-0,4	-1,2
Rp 6 – Rp 7	0,4	0,2	-0,6	0,6	0,6
Rp 7 – Rp 8	0,0	-0,2	0,0	0,2	0,0
Rp 8 – Rp 9	-0,2	0,0	0,0	-0,4	1,0
Rp 9 – Rp 10	-1,0	0,0	0,0	0,6	-1,2

На рисунках 34 и 35 представлены примеры сдвижений и деформаций по скважине № 6.

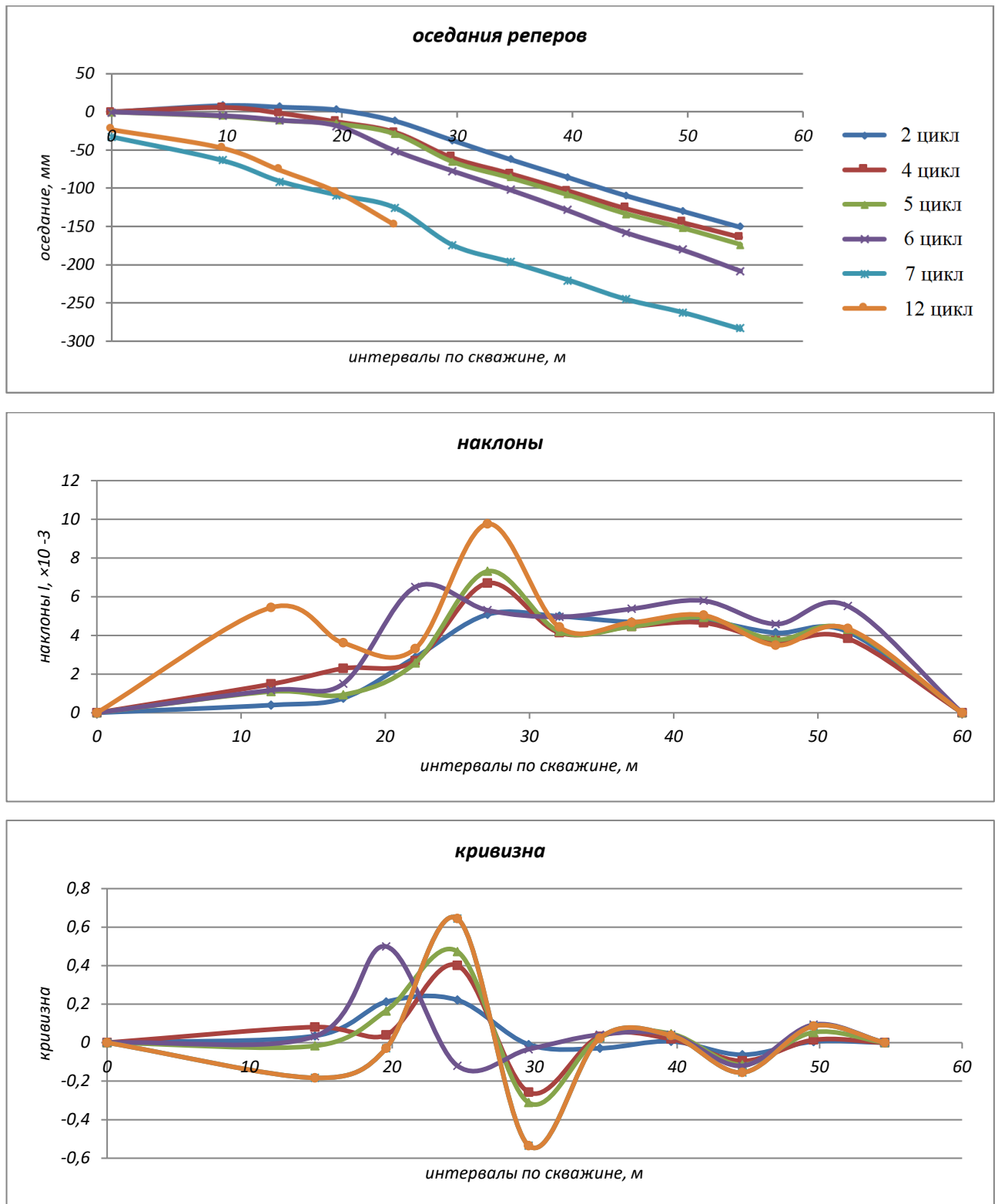


Рисунок 34. Вертикальные сдвижения и вертикальные деформации скважины № 6

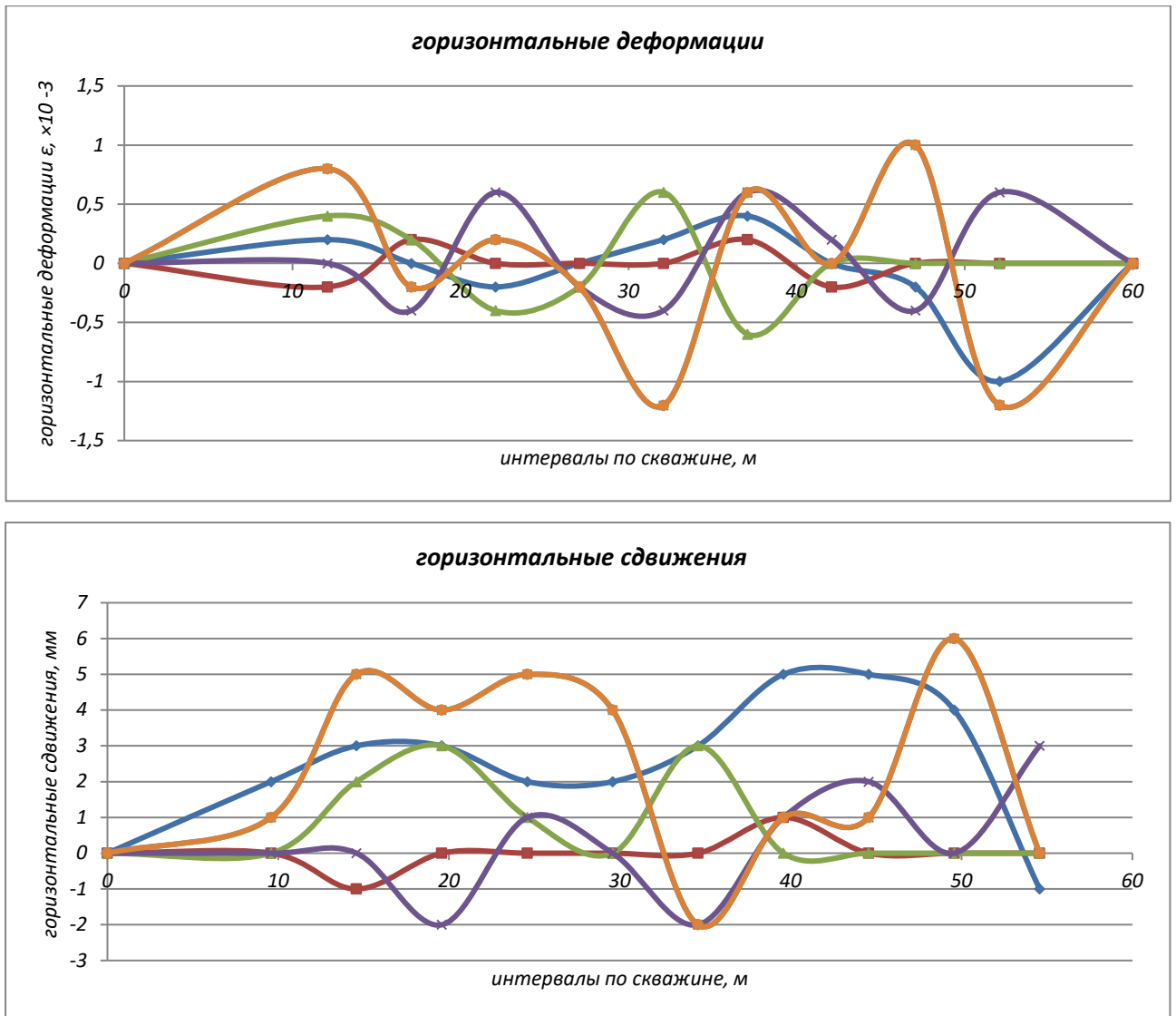


Рисунок 35. Горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации скважины № 6

В таблицах 33, 34, 35 представлены примеры результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных сдвижений по скважине № 6 (низ).

Таблица 33. Результаты оседания η , мм

Репер	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	11-й цикл	12-й цикл
0	0	0	0	0	0	-33	-27	-27	-30
Rp 1	5	-4	-4	-3	-1	-39	-29	-30	-24
Rp 2	10	-17	-13	-13	-9	-48	-37	-38	-34
Rp 3	15	-35	-29	-28	-23	-62	-51	-55	-55
Rp 4	20	-40	-30	-29	-23	-63	-60	-64	-53
Rp 5	25	-27	-21	-19	-11	-54	-65	-69	-39
Rp 6	30	-31	-26	-32	-29	-71			
Rp 7	35	-15	-7	-6	-30	-69			
Rp 8	40	-6	6	19	-33	-74			
Rp 9	45	-3	17	41	-38	-80			
Rp 10	50	-14	24	55	-45	-102			
Rp 11	55	-49	18	52	-80	-149			

Таблица 34. Результаты горизонтальных сдвижений ξ , мм

Репер	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1	9,0	1,0	-2,0	1,0	-1,0	0,0	1,0
Rp 2	9,0	-1,0	0,0	-1,0	3,0	3,0	-3,0
Rp 3	12,0	1,0	-1,0	1,0	1,0	1,0	-3,0
Rp 4	12,0	1,0	-1,0	1,0	-2,0	4,0	-6,0
Rp 5	11,0	0,0	0,0	1,0	-1,0	1,0	-2,0
Rp 6	-2,0	1,0	-1,0	0,0	2,0	1,0	3,0
Rp 7	-3,0	-2,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	-5,0
Rp 8	-13,0	-3,0	2,0	-4,0	0,0	6,0	-10,0
Rp 9	-3,0	-3,0	0,0	0,0	-2,0	5,0	-7,0
Rp 10	-2,0	-4,0	1,0	-2,0	-1,0	3,0	-7,0
Rp 11	6,0	-4,0	-2,0	4,0	1,0	-3,0	-7,0

Таблица 35. Результаты расстояний между реперами l, мм

Интервал	1-й цикл	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	4999	4999	4997	4999	4997	5001	5004	5000
Rp 2 – Rp 3	4997	5000	5002	5001	5003	5001	4999	4999
Rp 3 – Rp 4	4999	4999	4999	4999	4999	4996	4999	4996
Rp 4 – Rp 5	5006	5005	5004	5005	5005	5006	5003	5007
Rp 5 – Rp 6	5009	4996	4997	4996	4995	4998	4998	5003
Rp 6 – Rp 7	5000	4999	4996	4997	4996	4994	4993	4985
Rp 7 – Rp 8	5011	5001	5000	5002	4999	4999	5005	5000
Rp 8 – Rp 9	4995	5005	5005	5003	5007	5005	5004	5007
Rp 9 – Rp 10	4991	4992	4991	4992	4990	4991	4989	4989
Rp 10 – Rp 11	5001	5009	5009	5006	5012	5014	5008	5008

В таблицах 36, 37, 38 представлены примеры обработки результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных деформаций по скважине № 6 (низ).

На рисунках 36 и 37 представлены примеры сдвижений и деформаций по скважине № 6 (низ).

Таблица 36. Наклоны I, $\times 10^{-3}$

Интервал	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	2,5	1,9	1,9	1,8	1,7	1,5	1,8
Rp 2 – Rp 3	3,7	3,1	3,0	2,7	2,8	2,9	3,3
Rp 3 – Rp 4	1,0	0,4	0,2	0,1	0,3	1,7	1,7
Rp 4 – Rp 5	-2,6	-1,8	-1,9	-2,4	-1,9	0,9	1,1
Rp 5 – Rp 6	0,7	0,9	2,5	3,7	3,3	0,0	0,0
Rp 6 – Rp 7	-3,1	-3,8	-5,1	0,1	-0,2		
Rp 7 – Rp 8	-1,8	-2,5	-5,0	0,6	0,9		
Rp 8 – Rp 9	-0,6	-2,2	-4,5	1,1	1,2		
Rp 9 – Rp 10	2,2	-1,3	-2,8	1,3	4,3		

Таблица 37. Кривизна K, 1/м

Репер	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Rp 3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2
Rp 4	-0,4	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1
Rp 5	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5	-0,1	-0,1
Rp 6	-0,4	-0,5	-0,8	-0,4	-0,4	0,0	0,0
Rp 7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1		
Rp 8	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0		
Rp 9	0,3	0,1	0,2	0,0	0,3		
Rp 10	0,5	0,3	0,3	0,6	0,5		

Таблица 38. Горизонтальные деформации ϵ , $\times 10^{-3}$

Интервал	3-й цикл	4-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл
Rp 1 – Rp 2	0,0	-0,4	0,4	-0,4	0,8	0,6	-0,8
Rp 2 – Rp 3	0,6	0,4	-0,2	0,4	-0,4	-0,4	0,0
Rp 3 – Rp 4	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,6	0,6	-0,6
Rp 4 – Rp 5	-0,2	-0,2	0,2	0,0	0,2	-0,6	0,8
Rp 5 – Rp 6	-2,6	0,2	-0,2	-0,2	0,6	0,0	1,0
Rp 6 – Rp 7	-0,2	-0,6	0,2	-0,2	-0,4	-0,2	-1,6
Rp 7 – Rp 8	-2,0	-0,2	0,4	-0,6	0,0	1,2	-1,0
Rp 8 – Rp 9	2,0	0,0	-0,4	0,8	-0,4	-0,2	0,6
Rp 9 – Rp 10	0,2	-0,2	0,2	-0,4	0,2	-0,4	0,0

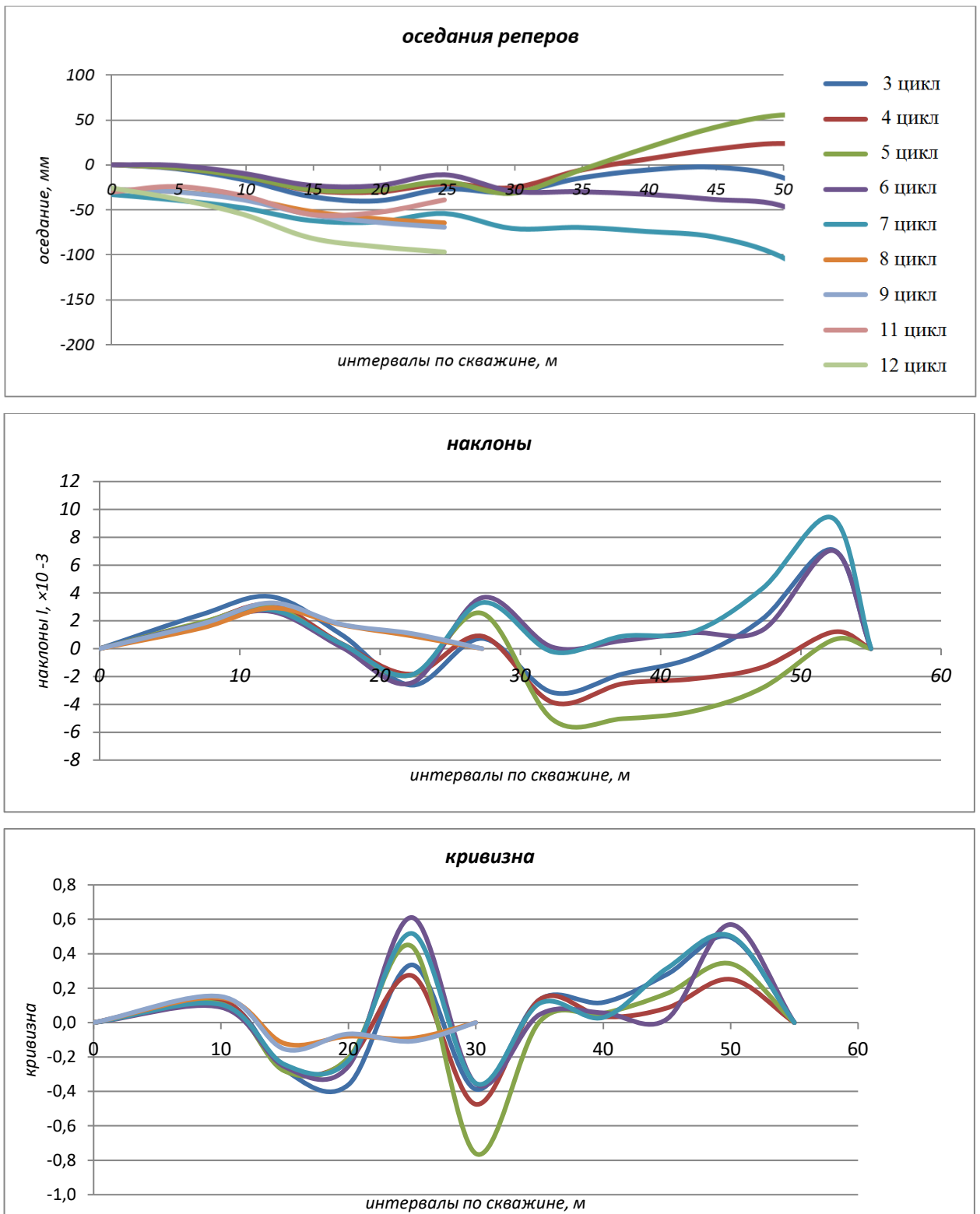


Рисунок 36. Вертикальные сдвигения и вертикальные деформации скважины № 6 (низ)

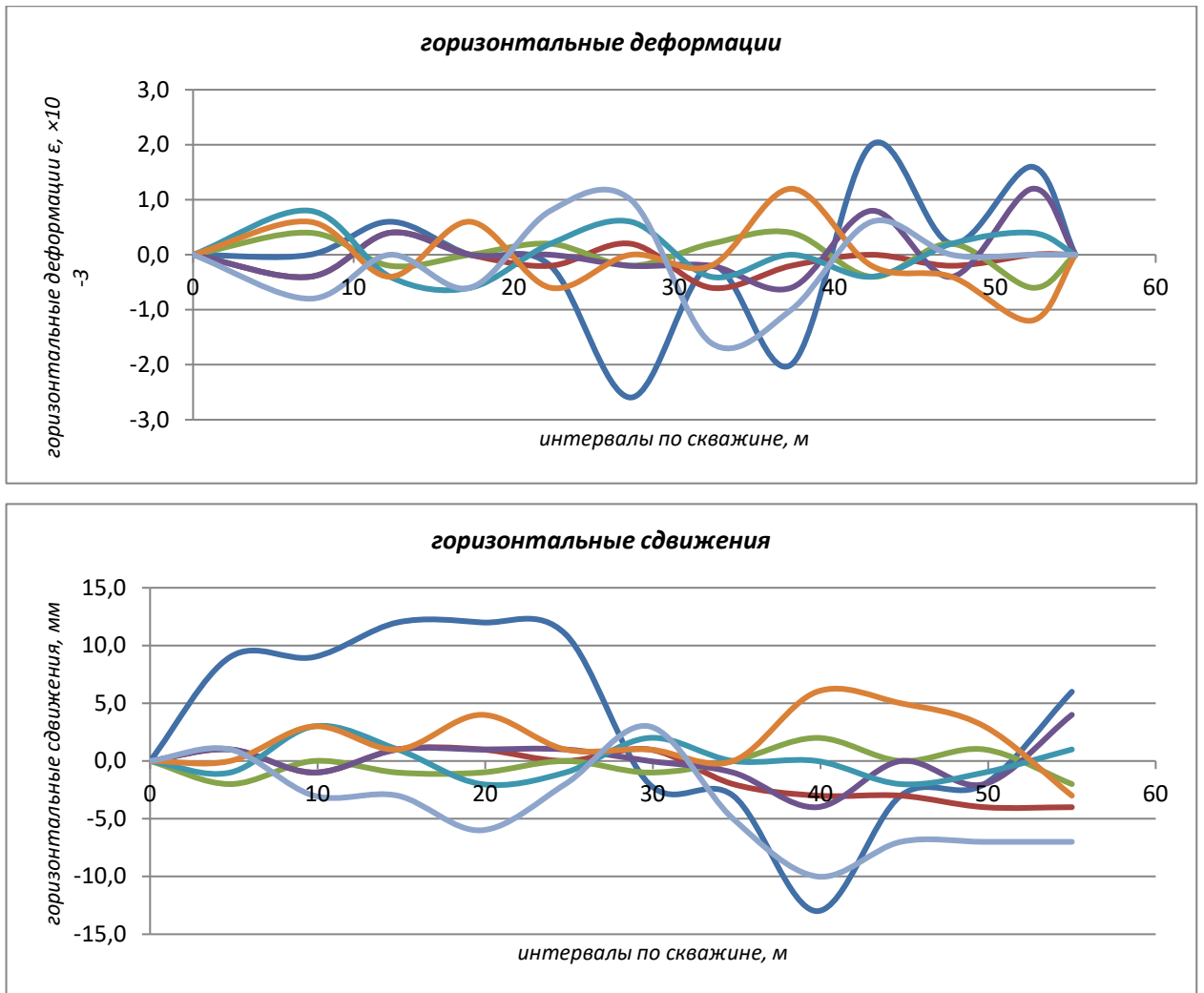


Рисунок 37. Горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации скважины № 6 (низ)

В таблицах 39, 40, 41 представлены примеры результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных сдвижений по скважине № 7.

Таблица 39. Результаты оседания η , мм

Репер	2-й цикл	3-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл	11-й цикл	12-й цикл
0	0	0	1	-2	1	-3	-3	1	-3	-2
Rp 1	-2	-2	3	1	6	2	0	5	0	-1
Rp 2	-17	-17	4	3	12	5	0	5	-11	-3
Rp 3	-25	-25	0	2	10	13	5	11	-2	3
Rp 4	-37	-37	-33	-27	-15	-23	-23	-21	-37	-29
Rp 5	-66	-66	-49	-42	-28	-35	-47	-36	-52	-40
Rp 6	-78	-78	-50	-41	-22	-36	-55	-46	-68	-50
Rp 7	-97	-97	-86	-80	-66	-105	-133			
Rp 8	-110	-110	-101	-97	-82	-128	-157			
Rp 9	-126	-126	-120	-116	-100	-150	-180			
Rp 10	-139	-139	-134	-110	-111	-166	-197			

Таблица 40. Результаты горизонтальных сдвижений ξ , мм

Репер	2-й цикл	3-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1	5,0	1,0	0,5	1,5	-1,0	2,5	2,3	-1,8
Rp 2	7,5	1,3	1,0	1,0	-2,3	9,5	-3,8	0,8
Rp 3	5,8	1,3	-0,3	1,0	-0,5	4,8	-4,0	7,0
Rp 4	7,8	0,3	0,0	2,3	-1,8	7,8	-8,0	4,3
Rp 5	6,0	1,5	-0,7	1,5	-1,3	4,5	-5,8	3,3
Rp 6	6,8	1,7	-1,0	0,0	-2,5	1,0	-2,0	1,5
Rp 7	8,8	0,5	0,5	0,2	1,0	9,0	-10,5	23,5
Rp 8	7,0	0,0	-0,7	1,5	0,7	9,5	-5,0	9,0
Rp 9	5,7	0,0	1,0	-1,5	2,0	4,7	0,5	-8,5
Rp 10	7,5	0,5	-0,2	1,5	-0,2	10,0	-7,3	5,2

Таблица 41. Результаты расстояний между реперами l, мм

Интервал	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp1 – Rp2	5026	5029	5029	5029	5029	5028	5035	5029	5031
Rp2 – Rp3	4972	4970	4970	4969	4969	4971	4966	4966	4972
Rp3 – Rp4	4997	4999	4998	4998	4999	4998	5001	4997	4994
Rp4 – Rp5	5001	4999	5000	4999	4999	4999	4996	4998	4997
Rp5 – Rp6	4996	4996	4997	4996	4995	4994	4990	4994	4992
Rp6 – Rp7	5026	5028	5026	5028	5028	5032	5039	5031	5053
Rp7 – Rp8	4998	4996	4996	4994	4996	4996	4996	5001	4987
Rp8 – Rp9	5006	5005	5005	5007	5003	5005	5000	5006	4988
Rp9 – Rp10	4996	4998	4998	4997	5000	4998	5003	4995	5009

В таблицах 42, 43, 44 представлены примеры обработки результатов наблюдений вертикальных и горизонтальных деформаций по скважине № 6 (низ).

Таблица 42. Наклоны I, $\times 10^{-3}$

Интервал	2-й цикл	3-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1 – Rp 2	3,1	3,1	-0,3	-0,4	-1,1	-0,6	0,1	0,1
Rp 2 – Rp 3	1,5	1,5	0,7	0,2	0,4	-1,5	-1,0	-1,2
Rp 3 – Rp 4	2,4	2,4	6,7	5,8	5,1	7,1	5,5	6,4
Rp 4 – Rp 5	5,8	5,8	3,3	3,0	2,6	2,6	4,8	2,9
Rp 5 – Rp 6	2,4	2,4	0,2	-0,3	-1,3	0,1	1,7	2,0
Rp 6 – Rp 7	3,9	3,9	7,0	7,9	8,7	13,7	15,4	0,0
Rp 7 – Rp 8	2,6	2,6	3,2	3,2	3,3	4,6	4,8	
Rp 8 – Rp 9	3,1	3,1	3,7	3,9	3,6	4,3	4,7	
Rp 9 – Rp 10	2,5	2,5	2,8	-1,2	2,3	3,3	3,3	

Таблица 43. Кривизна K, 1/м

Репер	2-й цикл	3-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 2	-0,2	-0,2	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Rp 3	0,1	0,1	0,6	0,6	0,5	0,9	0,7	0,8
Rp 4	0,3	0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,5	-0,1	-0,4
Rp 5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0,1
Rp 6	0,1	0,1	0,7	0,8	1,0	1,4	1,4	-0,2
Rp 7	-0,1	-0,1	-0,4	-0,5	-0,5	-0,9	-1,1	0,0
Rp 8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Rp 9	-0,1	-0,1	-0,1	-0,5	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
Rp 10	0,5	0,3	0,3	0,6	0,5			

Таблица 44. Горизонтальные деформации ε , $\times 10^{-3}$

Интервал	2-й цикл	3-й цикл	5-й цикл	6-й цикл	7-й цикл	8-й цикл	9-й цикл	10-й цикл
Rp 1 – Rp 2	0,5	0,0	0,1	-0,1	-0,2	1,4	-1,2	0,5
Rp 2 – Rp 3	-0,4	0,0	-0,3	0,0	0,4	-1,0	-0,1	1,3
Rp 3 – Rp 4	0,4	-0,2	0,1	0,3	-0,3	0,6	-0,8	-0,6
Rp 4 – Rp 5	-0,3	0,3	-0,1	-0,2	0,1	-0,7	0,5	-0,2
Rp 5 – Rp 6	0,2	0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,7	0,8	-0,4
Rp 6 – Rp 7	0,4	-0,2	0,3	0,0	0,7	1,6	-1,7	4,4
Rp 7 – Rp 8	-0,4	-0,1	-0,3	0,3	-0,1	0,1	1,1	-2,9
Rp 8 – Rp 9	-0,2	0,0	0,3	-0,6	0,2	-0,9	1,1	-3,5
Rp 9 – Rp 10	0,4	0,1	-0,3	0,6	-0,5	1,1	-1,5	2,8

На рисунках 38 и 39 представлены примеры сдвижений и деформаций по скважине № 7.

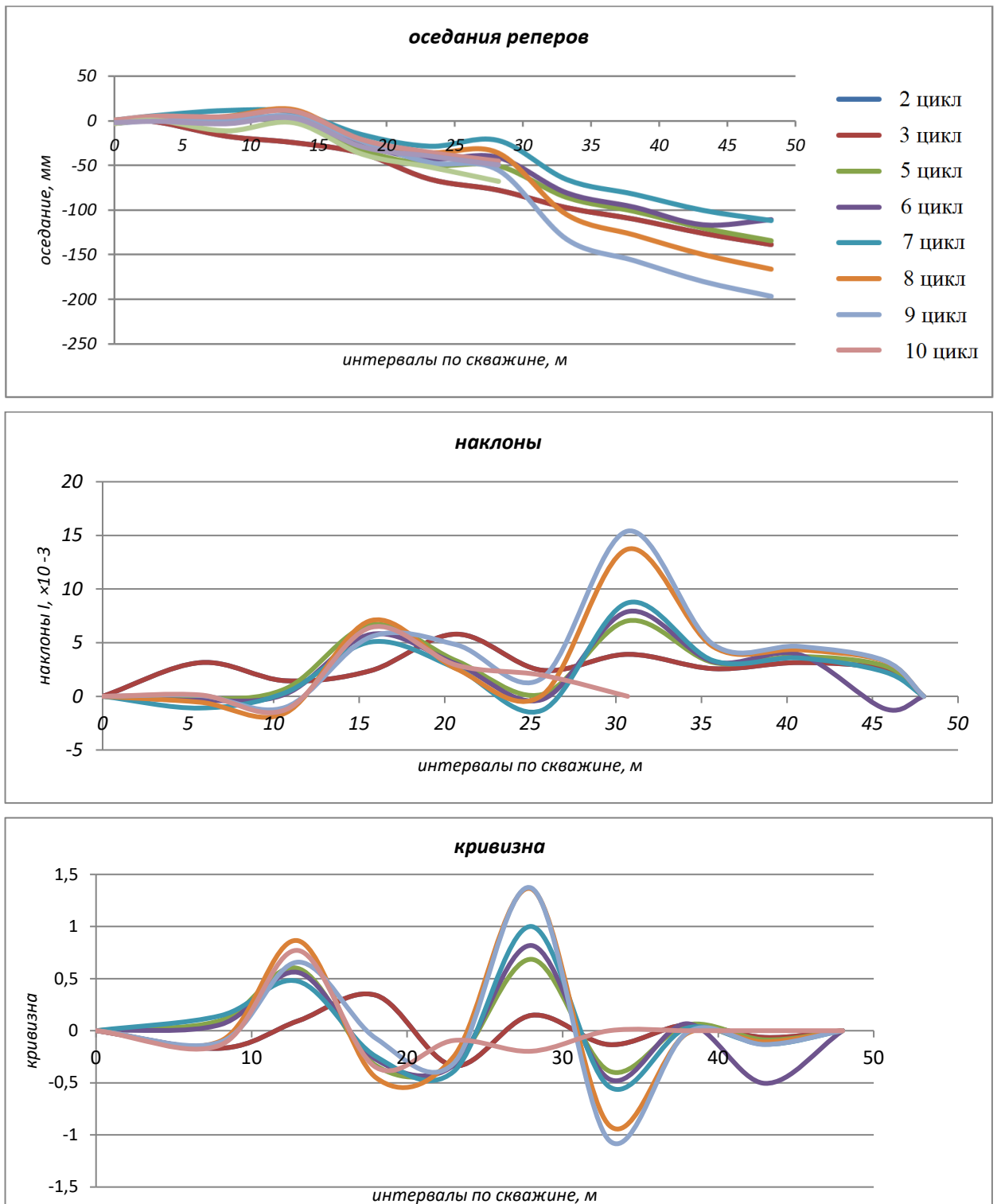


Рисунок 38. Вертикальные сдвижения и вертикальные деформации скважины № 7

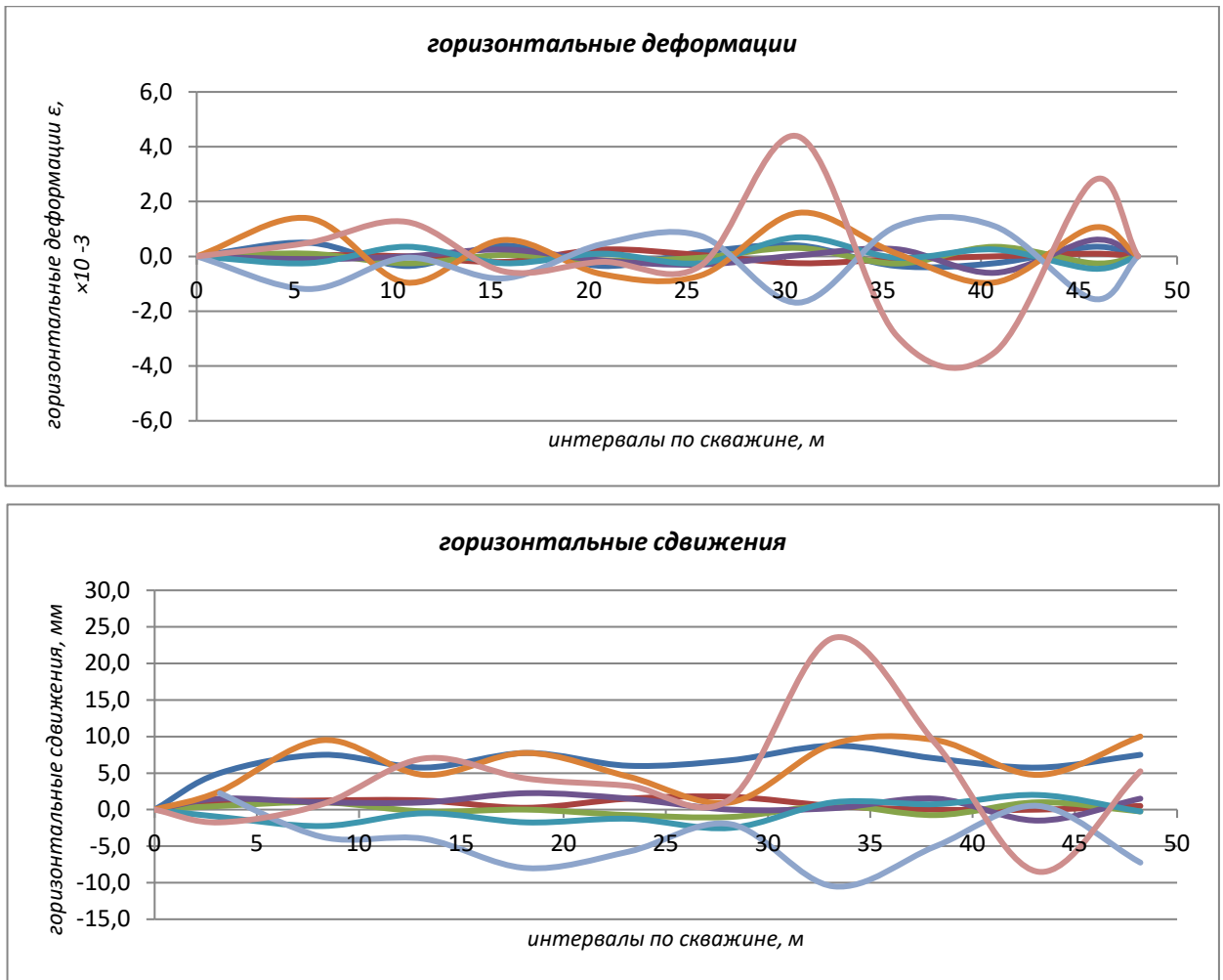


Рисунок 39. Горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации скважины № 7

3.3.2.3. Основные результаты инклинометрических исследований

Анализ результатов инструментальных наблюдений показал, что смещения в массиве горных пород, в районе производства наблюдений, имеют знакопеременный, непоследовательный и необратимый характер. Из этого следует, что деформации продолжают развиваться и после снятия деформационной нагрузки на массив горных пород переходной зоны.

Одинаковый порядок величин вертикальных сдвижений кровли (рудного тела) и почвы (несущий слой закладки) ленты № 33 подтверждают данные наблюдений по инклинометрическим скважинам и свидетельствуют о том, что слой деформируется как единая система. Характер распределения вертикальных

сдвижений кровли и почвы различается вследствие технологии возведения закладки ленты. При формировании закладочного массива в выработке, пройденной с уклоном 3–5°, образуются три «ступени», что при последовательном повторении способствовало накоплению вертикальных деформаций (наклонов и кривизны) в массиве переходной зоны. Это проявилось смятием скважин (№ 1, 6, 6 (низ), 7, 7 (низ)) на расстоянии 30 метров от их устьев, что привело к развитию трещин на этом участке массива переходной зоны, формируя его горизонтально слоистую (трещиноватую) структуру. Вероятно, данный процесс таким же образом будет развиваться в закладочном массиве. Также распределение оседаний в ленте № 33:

- более пологое в интервале до 50 метров, что аналогично распределению оседаний по скважинам № 4, 5;

- в интервале 100–130 м сосредоточены критические вертикальные деформации (наклоны $3,3 \div 4,0 \times 10^{-3}$), которые соответствуют распределениям оседаний на скважинах № 6, 6 (низ), где произошло смятие скважин и зафиксированы наклоны в диапазоне от $5,1 \times 10^{-3}$ до $9,8 \times 10^{-3}$.

Вышеизложенное дает основание считать, что на расстоянии 25–30 метров от контура рудного тела в исследуемой области на границе плоского дна мульды возник сдвиг/отрыв или срез, как показано на рис. 40. При полной подработки образуется плоское дно мульды сдвижений, что соответствует незначительным расстояниям до исследуемой области и при наличии большого объема выработанных пространств. В результате чего развиваются неравномерные оседания, что приводит к растяжению горных пород составляющих исследуемую часть массива, разделяющего области ведения горных работ. Что наблюдалось на всех инклинометрических скважинах, кроме скважин № 4, 5. Также зафиксированно, что обрыв/сдвиг происходит по причине возникающих знакопеременных вертикальных деформаций в результате оседания. При этом, часть скважины, которая позволяет продолжить наблюдения смещается в вертикальном направлении в связи с сокращением нагрузки из-за отделения части

массива горных пород, расположенного в центральной части исследуемого массива в переходной зоне.

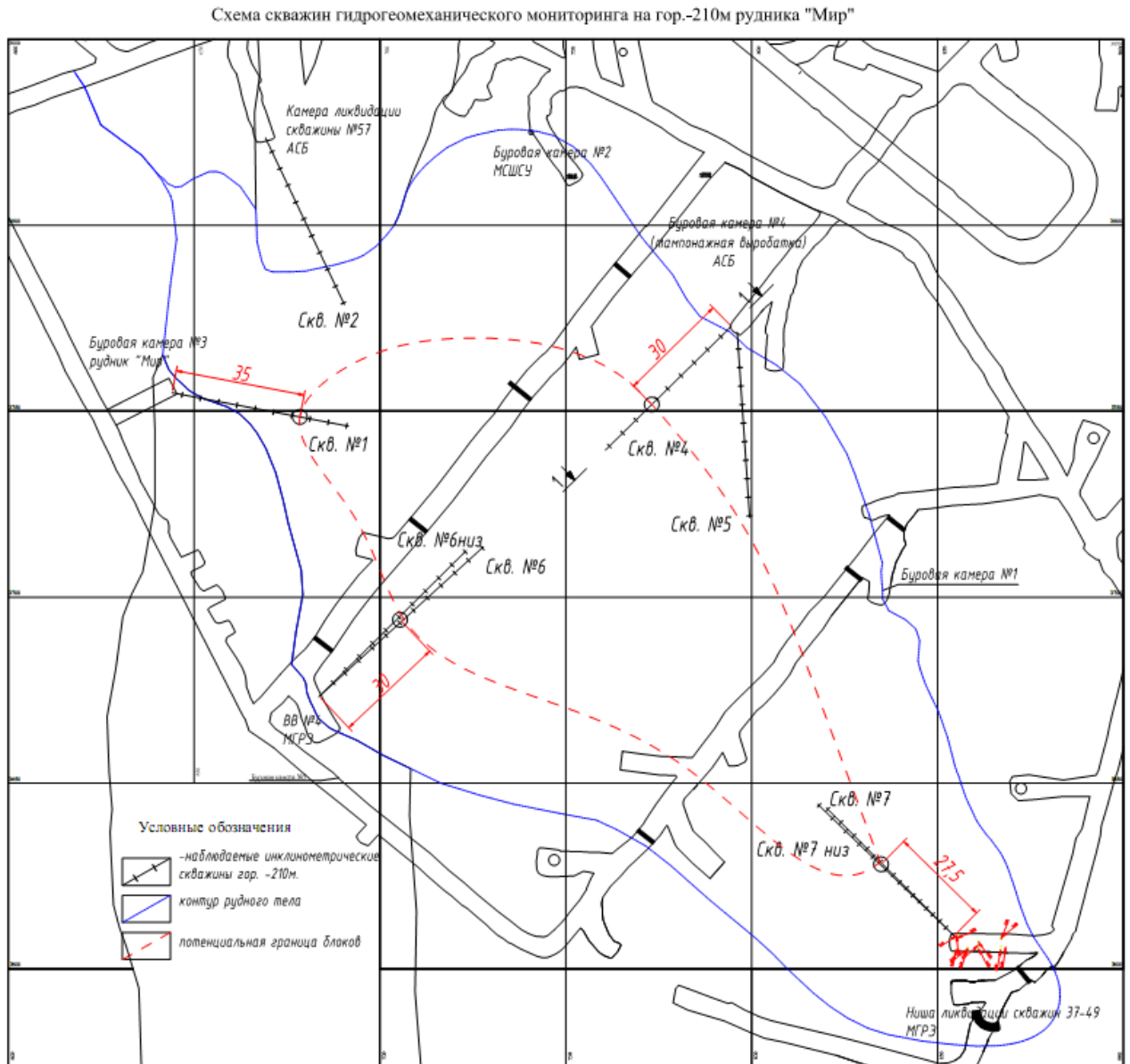


Рисунок 40. Схема расположения скважин и контура нарушенной области переходной зоны под дном карьера

Вследствие выбранного порядка горных работ в слагающих трубку породах (которые залегают под углом фактически 90°) провоцируется процесс уступообразования, характерный для условий наклонного и крутого падения пластов. Уступы образуются в местах сосредоточенных деформаций и уже существующих ослаблениях массива. Таким образом, природно-техногенные факторы в совокупности инициируют процесс формирования вертикальных блоков

шириной порядка 10 метров. При формировании уступов происходит изгиб слоев, сопровождающийся раскрытием и увеличением существующих трещин, по которым впоследствии поступает вода. Уступы образуются под действием касательных напряжений, возникающих при изгибе по плоскостям, имеющим меньший коэффициент трения. В результате изгиба наблюдаемого слоя возникают усилия, под действием которых происходит сдвиг пород.

3.3.2.4. Результаты комплексного использования геофизических и инклинометрических исследований

При совмещении результатов методов сейсмического просвечивания и инклинометрии прослеживается совпадение контура областей пониженных скоростей продольных волн ($< 3,5$ км/с) и получившимися смятиями на каждой из наблюдательных скважин (оседания реперов > 130 мм). На рис. 41 представлена карта результатов геофизических и инклинометрических исследований. Часть контурной линии инклинометрических измерений находится за пределами областей пониженных скоростей и выделена белым цветом. Ввиду этого рассчитано значение погрешности совпадения данных областей, равное менее 10%. Полученные результаты говорят о возможности использования инклинометрического метода для подтверждения или уточнения результатов метода сейсмического просвечивания.

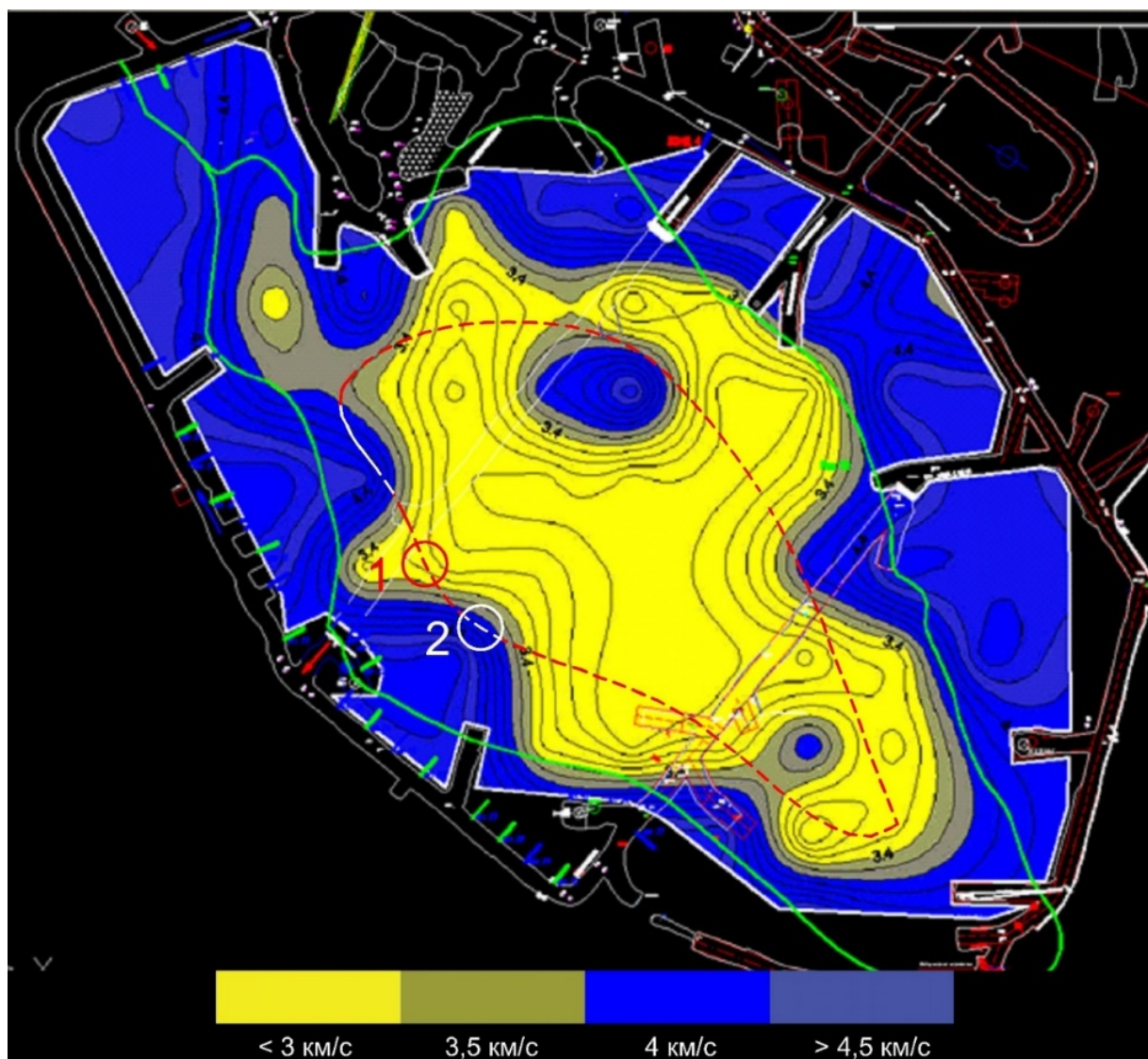


Рисунок 41. Совмещённая карта сейсмической томографии и инклинометрии с указаниями контуров совпадения (1) и расхождения результатов (2)

Для нахождения связи результатов измерений методов сейсмического просвечивания и инклинометрии проведен анализ зависимости скорости продольных волн от оседания измерительных скважин. Для этого были отобраны результаты инклинометрии по скважинам с достоверными значениями оседаний. На рисунке 42 приведены результаты по мониторингу 27 глубинных реперов инклинометрических скважин и соответствующих им продольными скоростями МСП за два года исследования.

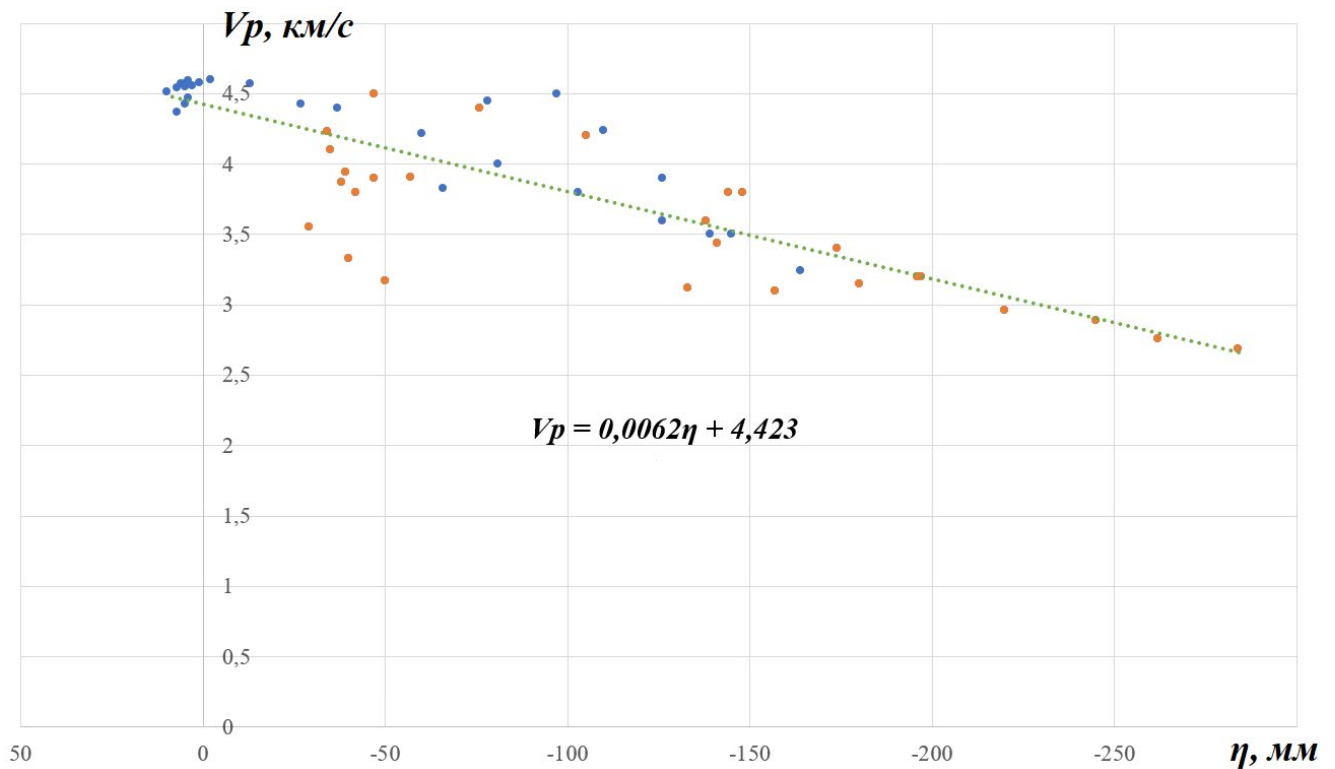


Рисунок 42. Корреляционная зависимость скорости продольных волн от оседания реперов инклинометрических скважин

Корреляционный анализ взаимосвязи $V_p = f(\eta)$ показал её высокую качественную характеристику по шкале Чеддока (коэффициент корреляции $r = 0,85$). Данная зависимость описывается уравнением:

$$V_p = 0,0062\eta + 4,423. \quad (16)$$

Таким образом, значения скоростей продольных волн определяются через рассчитанные значения оседаний измерительных скважин по парной линейной регрессионной модели и могут быть использованы для уточнения результатов данных методов. В свою очередь, данная зависимость позволит в дальнейшем оценивать деформации, возникаемые в рудном массиве, через результаты расчёта скоростей продольных волн для вертикальных скважин методом УЗК.

3.3.2.5. Анализ полученных результатов

По результатам инклинометрических и геофизических наблюдений установлено, что массив горных пород переходной зоны находится в неустойчивом состоянии. На некоторых участках достигнуты критические значения деформации и выявлены области пониженных скоростей, что говорит о нарушенности переходной зоны. Массив горных пород на исследуемом участке представляет собой горизонтально слоистую (трещиноватую) среду, обладающую низкими связями на контактах. Что подтверждается следующими проведенными замерами:

- области расположения и размеры дискретного распределения деформаций исследуемого массива;
- изменения (срезы и замятия) в обсадке скважин рассматриваемых зон;
- определение среднего значения динамического модуля упругости путем наблюдения в течении трех лет, которое сократилось на величину свыше 16%.

Также в исследуемой зоне на границе плоского дна мульды зафиксирован сдвиг/отрыв на удалении 25–30 метров от рудного тела, а горные породы рассматриваемой зоны оказались подвержены растяжению из-за неравномерных оседаний. Данный процесс фиксировался на скважине № 1 на расстоянии 35 метров, на скважине № 5 на расстоянии 30 метров, на скважине № 6 на расстоянии 25 метров, на скважине № 6 (низ) на расстоянии 25 метров, на скважине № 7 на расстоянии 30 метров от выработки. Исключение составила скважина № 4, результаты были равномерны и без отрыва. Также установлено, что с увеличением оседания под воздействием знакопеременных вертикальных деформаций происходит обрыв. В результате снижения нагрузки при отрыве части массива исследуемой зоны оставшаяся пригодная для измерений часть контрольной скважины поднимается относительно абсолютных отметок. По результатам сейсмического просвечивания на исследуемом горизонте выделяются зоны повышенной трещиноватости (на томографических картах выделены оттенками жёлтого цвета), указывающие на значительное снижение упругих свойств кимберлитов и ослабление переходной зоны в целом.

При совместном использовании данных методов прослеживается совпадение контура областей пониженных скоростей и получившимися отрывами (или

сдвигами, срезами) на каждой из скважин. Также определена высокая корреляционная связь характеристик данных методов. Полученные результаты говорят о возможности использования инклинометрического метода для подтверждения или уточнения результатов сейсмического просвечивания.

Результаты исследования показали, что переходная зона находится в сильно нарушенном состоянии и представлена горизонтальной слоистостью (трещиноватостью). По имеющимся трещинам и разломам происходят основные сдвиги. Согласно циклу наблюдений, физико-механические свойства горных пород переходной зоны за время наблюдений уменьшились на величину свыше 10% по отношению к предыдущему году наблюдений.

К моменту завершения последнего цикла исследований почти все наблюдательные скважины были выведены из рабочего состояния критическими деформациями. Обрывы (или сдвиги, срезы) скважин совпадают с границами области повышенной фильтрации, что подтверждают выводы по сейсмическому просвечиванию и доказывают правильность интерпретации данных для томографической обработки.

3.4. Выводы

Основные научные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

1. Проанализированы различные методы определения свойств и состояния переходной зоны в условиях современного горного предприятия с подземным способом добычи по схеме нисходящей выемки запасов полезных ископаемых горизонтальными слоями с твердеющей закладкой.

2. По результатам геофизических наблюдений в переходной зоне фиксируются области повышенной трещиноватости. Как показали исследования, переходная зона сильно нарушена и имеет горизонтально слоистую (трещиноватую) структуру, сдвиги за исследуемый период происходят в основном по уже имеющимся трещинам.

3. На основе томографической обработки получены карты изолиний скоростей продольных волн в переходной зоне, показано, что при геотехнологической концепции закладки выработанного пространства по традиционной схеме нисходящей выемки запасов полезных ископаемых образуется зона недозаклада, способствующая негативному изменению свойств горных пород переходной зоны.

4. Результаты ультразвукового каротажа показали значительную изменчивость свойств на малых интервалах, что свидетельствует о горизонтально слоистой (трещиноватой) структуре массива горных пород с размерами 0,2–0,4 м. Ультразвуковые измерения целесообразно применять для определения свойств рудного массива на локальных участках, а также для лабораторных определений физико-механических свойств и установления корреляционных связей для последующей интерпретации данных сейсмического просвечивания в величинах степени трещиноватости, интегральных физико-механических свойств.

5. По результатам инклинометрических наблюдений установлено, что массив горных пород переходной зоны находится в неустойчивом состоянии. Деформации на некоторых участках достигли своих критических значений, в результате чего была нарушена целостность переходной зоны. Массив горных пород переходной зоны представляет собой горизонтально слоистую (трещиноватую) среду со снижением связей на их контактах. Сделанный вывод подтверждается инструментальными измерениями, фиксировавшими места и величины дискретного распределения деформаций массива горных пород, а также произошедшими на этих участках срезами и замятиями обсадки скважин.

6. Результаты исследования в целом показали, что переходная зона находится в сильно нарушенном состоянии и имеет горизонтально слоистую (трещиноватую) структуру. По имеющимся трещинам и разломам происходят основные сдвигения. Согласно циклу наблюдений, свойства горных пород переходной зоны снизились более чем на 10% за весь период исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новая методика для решения научной задачи мониторинга геологических условий при техногенном воздействии на основе совместного использования данных сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии.

Основные научные результаты и выводы работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Исследованы закономерности вариаций скоростей упругих волн для кимберлитов в переходной зоне, позволившие установить критическую величину скорости продольных волн ($< 3,5$ км/с), характеризующую области разуплотнения кимберлитов.

2. По результатам ультразвукового каротажа выявлено значительное изменение свойств кимберлитов на базе измерений 0,2–0,4 м, что свидетельствует о горизонтально слоистой (трещиноватой) структуре кимберлитов переходной зоны.

3. На основе анализа томографических карт установлено устойчивое снижение скоростей упругих волн в переходной зоне на 3–6% в год.

4. За трехлетний период наблюдений зафиксировано увеличения размеров области разрушения кимберлитов в переходной зоне под дном карьера на 86% и соответствующее снижение в ней средней скорости упругих волн и динамического модуля упругости соответственно, на 10% и 16%.

5. Получена корреляционная зависимость для оперативной оценки величины деформаций кимберлитового массива на основе скоростей продольных волн:

$$V_p = 0,0062\eta + 4,423,$$

где V_p – скорость продольной волны, км/с; η – оседания, мм.

6. Обоснована и разработана методика мониторинга нарушенности переходной зоны под дном карьера при техногенном воздействии на него, включающая методы сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрию, что позволяет анализировать ее геомеханическое состояние.

7. Создан опытный образец беспроводной сейсмической аппаратуры для оперативной оценки упругих свойств горных пород переходной зоны под дном карьера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ватолин, Е.С. Методы и средства контроля состояния и свойств горных пород в массиве [Текст] / Е.С. Ватолин, А.Б. Черняков, А.Д. Рубан, А.М. Потапов. – Москва: Недра, 1989. – 173 с.
2. Ардашев, К.А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления: Справочник [Текст] / К.А. Ардашев, В.И. Ахматов, Г.А. Катков. – Москва: Недра, 1981. – 129 с.
3. Курленя, М.В. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород [Текст] / М.В. Курленя, В.Н. Опарин. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 335 с.
4. Загорский, Л.С. Разработка бесскважинного сейсмического метода оценки напряженного состояния краевой части тонких пологих пластов угля [Текст]: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.15.11) / Загорский Л.С.; ИГД им. А.А. Скочинского. – Москва, 1987 – 14 с.
5. Курленя, М.В. Теоретические основы определения напряжений в горных породах [Текст] / М.В. Курленя, С.Н. Попов // Отв. ред. Шемякин Е.И. – Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1983. – 97 с.
6. Курленя, М.В. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах [Текст] / М.В. Курленя, В.К. Аксенов, А.В. Леонтьев и др. // Отв. ред. Шемякин Е.И. – Новосибирск: Наука, 1975. – 150 с.
7. Курленя, М.В. Руководство по оценке состояния и свойств угольного массива скважинными гидравлическими датчиками [Текст] / М.В. Курленя, В.К. Аксенов, В.К. Федоренко. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1979. – 58 с.
8. Грицко, Г.И. Измерение напряжений в горных породах фотоупругими датчиками / Отв. ред. Шемякин Е.И. [Текст] / Г.И. Грицко, Г.И. Кулаков. – Новосибирск: Наука, 1978. – 143 с.
9. Лавров, И.М. Результаты шахтных наблюдений при исследовании напряженного состояния призабойной части угольного пласта с помощью плоских

электротензометрических жестких датчиков [Текст] / И.М. Лавров // Рудничная аэрология и внезапные выбросы угля, породы и газа: научн. сообщения. – Москва: Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского, 1976. – С. 31-35.

10. Напряженное состояние породных массивов [Текст]: Сб. научн. тр. / Отв. ред. Курленя М.В. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. – 147 с.

11. Шерифф Р. Сейсморазведка [Текст] / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – Москва: Мир, 1987. – Т.1. – 448 с.

12. Смирнов, В.А. Учет влияния слоистости массива на результаты электрометрических измерений // Тез. выступлений Всесоюзной научно-техн. конф. Исследование, прогноз и контроль проявления горного давления [Текст] / В.А. Смирнов, Е.А. Маркина. – Ленинград, 1982. – С. 84-85.

13. Турчанинов, И.А. Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве [Текст] / И.А. Турчанинов, В.И. Панин. – Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1976. – 224 с.

14. Ямщиков, В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов: Учебник для вузов [Текст] / В.С. Ямщиков. – Москва: Недра, 1982. – 296 с.

15. Гречухин, В.В. Геофизические методы изучения геологии угольных месторождений [Текст] / В.В. Гречухин, П.А. Бродский, А.А. Климов и др. – Москва: Недра, 1995. – 477 с.

16. Лазаревич, Л.М. Определение направлений действия главных напряжений методом электрометрии [Текст] / Л.М. Лазаревич // Геофизические основы контроля напряжений в горных породах – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. – С. 15–19.

17. Скакун А.П. Разработка методов оценки степени удароопасности участков массива угля и пород на основе геоэлектрических измерений [Текст]: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / ВНИМИ. – Л., 1985. – 20 с.

18. Матов Ш.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с помощью наблюдений импульсной электромагнитной активности [Текст] / Матов Ш.Р., Саломатин В.Н., Яворович Л.В. // Геофизические основы

контроля напряжений в горных породах. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. – С. 23–26.

19. Воробьев А.А. О природе электромагнитных волн, излучаемых глинистыми грунтами при их нагружении [Текст] / Воробьев А.А. и др. // Проблемы нефти и газа Тюмени. – 1974. – Вып. 24. – С. 77–80.

20. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 271 с.

21. Ляховицкий, Ф.М. Инженерная геофизика [Текст] / Ф.М. Ляховицкий, В.К. Хмелевской, З.Г. Яценко. – Москва: Недра, 1984. – 252 с.: ил.

22. Мамбетов, Ш.А. Определение и контроль диэлектрической проницаемости пород в условиях естественного залегания [Текст] / Ш.А. Мамбетов, В.М. Салеев // Геофизические основы контроля напряжений в горных породах. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. – С. 32-38.

23. Никитина В.Н., Эненштейн Б.С. Определение электрических свойств пород кристаллического фундамента в естественном залегании // Физика Земли. – 1968. – № 12.

24. Пархоменко, Э.И. Электрические свойства горных пород [Текст] / Э.И. Пархоменко. – Москва: Недра, 1965. – 164 с.

25. Глушко, В.Т. Геофизический контроль в угольных шахтах [Текст] / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – Киев: Наукова думка, 1978. – 224 с.

26. Тяпкин, К.Ф. Основы геофизики [Текст] / К.Ф. Тяпкин, О.К. Тяпкин, Н.А. Якимчук. – Киев: Карбон Лтд, 2000. – 258 с.

27. Правила безпеки у вугільних шахтах: ДНАОП 1.1.30 – 1.01-96: Затв. Держнагляддохоронпраці України 18.01.96 р. / Вид. ГПРВО Поліграфкнига. – Киев, 1996. – 421 с.

28. Азаров, Н.Я. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений [Текст] / Н.Я. Азаров, Д.В. Яковлев. – Москва: Недра, 1988. – 199 с.

29. Заборовский, А.И. Электроразведка [Текст]: [Учебник для геол.-развед. вузов и фак.]. - [Изм. и перераб. изд.]. – Москва: Гостоптехиздат, 1963. – 423 с.

30. Краев, А.П. Основы геоэлектрики [Текст] / А.П. Краев. – Москва: Недра, 1965. – 587 с.
31. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. – М.: Недра, 1965.
32. Комплексование геофизических методов при решении геологических задач / Под ред. Никитского В.Е., Бродового В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
33. Моисеенко, У.И. Электрические и тепловые свойства горных пород в условиях нормальных и высоких температур и давлений [Текст] / У. И. Моисеенко, Л. С. Соколова, В. Е. Истомин ; Отв. ред. чл.-кор. АН СССР Э. Э. Фотиади ; АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т геологии и геофизики. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-ние, 1970. – 67 с.
34. Дальнов А.С. Исследование применимости и обоснование электрометрического метода эффективного сопротивления для прогноза горных ударов / Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Пермь: Фонды НИИ, 1972.
35. Буршан В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. – Л.: Недра, 1972.
36. Варлашов Н.М., Лобанов Е.М. К вопросу изучения неоднородных сред методами электроразведки на постоянном токе: Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 97. – М., 1975.
37. Павлова Т.А. Определение водопроводимости водоносных горизонтов и коэффициентов перетекания слабопроницаемых слоев с помощью метода ВЭЗ: Изв. вузов. Геология и разведка. – № 3. – 1977.
38. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы: Учебное пособие по дисциплине горная геофизика / Московский горный институт. – М., 1990.
39. Глушко, В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях [Текст] / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланская. – Москва: Недра, 1987. – 278 с.
40. Протодяконов, М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве [Текст] / М. М. Протодяконов, С. Е. Чирков; Акад. наук СССР. Гос. ком.

по топливной пром-сти при Госплане СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. – Москва: Наука, 1964. – 67 с.

41. Ардашев К.А. и др. Методика изучения трещиноватости осадочных горных пород применительно к решению задач управления горным давлением: Труды ВНИМИ. – Сб. 51. – 1964.

42. Куваев И.Н. Особенности методики изучения и характеристики трещиноватости массива горных пород для оценки его устойчивости: Труды ВНИМИ. – Сб. 32. – 1958.

43. Петухов, И.М. Геофизические исследования горных ударов [Текст] / И.М. Петухов, В.А. Смирнов, Б.Ш. Винокур, А.С. Дальнов. – Москва: Недра, 1975. – 136 с.

44. Ямщиков, В.С. Контроль процессов горного производства [Текст] / В.С. Ямщиков. – Москва: Недра, 1989. – 446 с.: ил.

45. Силаева О.И. Исследование с помощью ультразвука скоростей распространения упругих волн и упругих параметров в образцах горных пород при одностороннем давлении: Труды ИФЗ АН СССР. – 1962. – № 27.

46. Мячкин В.И. Ультразвуковые исследования напряженного состояния и свойств горных пород в массиве: Дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. – М.: Фонды ИФЗ АН СССР, 1965.

47. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: Справочник / Баюк Е.И., Томашевская И.С., Добрынин В.М. и др. / Под ред. Воларовича М.П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 255 с.: ил.

48. Дахнов, В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород [Текст] / В. Н. Дахнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1985. – 310 с.

49. Турчанинов, И.А. Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве [Текст] / И. А. Турчанинов, В. И. Панин; АН СССР, Кольск. филиал им. С. М. Кирова, Горный ин-т. – Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1976. – 163 с., 1 л. схем.: ил.; 22 см.

50. Петухов, И.М. Геофизические исследования горных ударов [Текст] / И.М. Петухов, В.А. Смирнов, Б.Ш. Винокур, А.С. Дальнов. – Москва: Недра, 1975. – 136 с.

51. Тиркель М.Г., Захаров В.Н., Чеславский С.В., Щеголева Т.А. О состоянии и направлении научно-исследовательских работ в области шахтной сейсморазведки. Депонировано в ЦНИЭИуголь 23.03.88 г. № 4472 – уп. 88.

52. Захаров В.Н., Мартынюк А.Р., Стариковский С.В. Разработка структурных схем и определение конфигурации локационного аппаратного комплекса поиска людей в завалах горных выработок. Борьба с авариями в шахтах: Сб. науч. тр. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000. – Вып. 15. – С. 81–83.

53. Ногих С.Р., Дурнин М.К., Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Кумахов М.Г. О направлениях сотрудничества с ИРО, ИГД им. А.А. Скочинского, ИПКОН РАН в создании приборного обеспечения нового поколения для развития существующих меодов исследования горного массива. Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2001: Материалы IV Междунар. научно-практической конференции. – Кемерово, 2001.

54. Захаров В.Н., Тиркель М.Г., Чеславский С.В. Исследование влияния наведенной анизотропии горного массива на сейсмические волновые поля SH-поляризации: Тезисы докл. Всесоюзной научно-техн. конф. Молодые ученые КАТЭКу. – Красноярск, 1988.

55. Безкаравайный В.Г. Исследование устойчивости неоднородных целиков: Автореферат канд. дис. – Л., 1964.

56. Временная инструкция по методике расчета целиков при камерных системах разработки Миргалимсайского месторождения. Изд. ИГД им. А.А. Скочинского и ВНИМИ. – М., 1964.

57. Анциферов, А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки [Текст] / А.В. Анциферов. – Донецк: Алан, 2002. – 312 с.

58. Азаров, Н.Я. Прогноз строения и состояния массива горных пород методами шахтной и наземной сейсморазведки [Текст] / Н.Я. Азаров, А.В. Анциферов // Уголь Украины. – 1993. – № 12. – С. 12–13.

59. Анциферов А.В. Прогноз горно-геологических условий отработки угольных пластов методами шахтной геофизики. – Киев: УкрГГРИ, 2003. – 48 с.
60. Анциферов А.В., Довбнич М.М., Калашник А.А., Майборода А.А., Мендрий Я.В., Солдатенко В.П., Тиркель М.Г., Тяпкин К.Ф. Комплексирование геофизических методов. – Донецк: Вебер (Донецкий филиал), 2008. – С. 280–282.
61. Гурвич, И.И. Сейсмическая разведка [Текст] / И.И. Гурвич, Г.Н. Бочаник. – Москва: Недра, 1980. – 551 с.
62. Померанц, Л.И. Геофизические методы исследования нефтяных и газовых скважин [Текст] / Л.И. Померанц, М.Т. Бондаренко, Ю.А. Гулин, В.Ф. Козяр. – Москва: Недра, 1981. – 376 с.
63. Горбачев, Ю.И. Геофизические исследования скважин [Текст] / Ю.И. Горбачев. – Москва: Недра, 1990. – 398 с.
64. Дьяконов, Д.И. Общий курс геофизических исследований скважин [Текст] / Д.И. Дьяконов, Е.И. Леонтьев, Г.С. Кузнецов. – Москва: Недра, 1984. – 432 с.
65. Ляховицкий Ф.М. О соотношении упругих и прочностных свойств горных пород // Геофизические исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1964.
66. Мельников, Н.В. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород [Текст] / [Сост. проф., д-р техн. наук М. М. Протодьяконов, кандидаты техн. наук Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер и др.]; [Под ред. акад. Н. В. Мельникова [и др.]. – Москва: Недра, 1975. - 279 с.
67. Балавадзе, Б.К. Наклоны и деформации земной коры в районе Ингурской ГЭС [Текст] / Б. К. Балавадзе, В. Г. Абашидзе. - Тбилиси: Мецниереба, 1985. - 116 с.
68. Бауков, Ю.Н. Горная геофизика: Учебное пособие. – Москва: МГГУ, 1996.
69. Савич, А.И. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород [Текст] / А. И. Савич, В. И. Коптев, В. Н. Никитин, З. Г. Яценко; под ред. д-ра техн. наук А. М. Епинатьевой. - Москва: Недра, 1969. - 239 с.

70. Савич, А.И. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений [Текст] / А.И. Савич, Б.Д. Куюнджич, В.И. Коптев и др. – Москва: Недра, 1990. – 461 с.

71. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике [Текст] / Л. Бергман. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 726 с.

72. Методические рекомендации по проведению мониторинга геодинамических явлений в рудном теле и закладочном массиве при отработке блока № 1 трубки «Мир». – ИПКОН РАН, 2011.

73. Белоусов, Ф.С. Трехкомпонентный шпуровой геофон [Текст] / Ф.С. Белоусов // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 10-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 18–22 ноября 2013 г. – Москва: ИПКОН РАН, 2013. – С. 101.

74. Белоусов, Ф.С. Регистратор сейсмоакустический шахтный [Текст] / Ф.С. Белоусов // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 11-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 24–28 ноября 2014 г. – М: ИПКОН РАН, 2014. – С. 99.

75. Белоусов, Ф.С. Сейсмостанция беспроводная шахтная [Текст] / Ф.С. Белоусов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 11. – С. 361–364.

76. Закалинский, В.М. Система контроля воздействия взрывных импульсов на подземные выработки, ведущиеся в непосредственной близости от границ карьера [Текст] / В.М. Закалинский, А.Е. Франтов, А.П. Аверин, Ф.С. Белоусов, Мингазов Р.Я. // Маркшейдерия и недропользование. – 2016. – № 4 (84). – С. 17.

77. Закалинский, В.М., Система сейсмического контроля воздействия массовых взрывов в карьере на подземные выработки [Текст] / В.М. Закалинский, А.Е. Франтов, А.П. Аверин, Ф.С. Белоусов, Р.Я. Мингазов // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр; под редакцией академика К.Н. Трубецкого. – Москва: ИПКОН РАН, 2016. – С. 63.

78. Аверин, А.П. Применение сейсмической аппаратуры для сравнительного анализа буровзрывных работ [Текст] / А.П. Аверин, Ф.С. Белоусов, Е.В. Красюкова

// Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 13-й Международной научной школы молодых учёных и специалистов. – 21–25 ноября 2016 г. – Москва: ИПКОН РАН, 2016. – С. 222.

79. Закалинский, В.М. Об эффективности модификации взрывчатых составов при разномасштабной взрывной отбойке [Текст] / В.М. Закалинский, А.Е. Франтов, А.П. Аверин, Р.Я. Мингазов, Ф.С. Белоусов // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр; под редакцией академика К.Н. Трубецкого. – Москва: ИПКОН РАН, 2016. – С. 67.

80. Аверин, А.П. Сравнительный анализ взрывных импульсов, распространяющихся от границ карьера к подземным горным выработкам, шахтной сейсмической аппаратурой [Текст] / А.П. Аверин, Ф.С. Белоусов, Е.В. Красюкова // Современные инновационные технологии в горном деле и при первичной переработке минерального сырья: Материалы международной научно-практической конференции. – Москва: Винпресс, 2018. – С. 251-254.

81. Аверин, А.П. Результаты сейсмического профилирования на выемочном участке угольной шахты [Текст] / А.П. Аверин, Ф.С. Белоусов // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр; под редакцией академика К.Н. Трубецкого. – Москва: ИПКОН РАН, 2018. – С. 151.

82. Аверин, А.П. Исследование состояния горного массива геофизическими методами при комбинированной разработке кимберлитовых трубок / А.П. Аверин, А.Е. Франтов, Ф.С. Белоусов // Инженерная физика. – 2019. – № 12. – С. 52.

83. Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры : Материалы всесоюз. школы-семинара "Измерение напряжений и их прил. в прогнозе землетрясений", г. Апатиты, 20-22 мая 1980 г. / [Отв. ред. М. А. Садовский]. - Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1982. - 146 с.

84. Ямщиков, В.С. Контроль качества на предприятиях нерудных строительных материалов / В. С. Ямщиков, М. Л. Нисневич. - Ленинград: Стройиздат : Ленингр. отд-ние, 1981. - 263 с.

85. Biot, M.A., Mechanics of Incremental Deformation, 504pp. John Wiley, New York, 1965.

86. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. – Part I. Low frequency range. – J. Mech. and: Phys. Solids, 1963, 11, p. 127 – 140.
87. Гречухин, В.В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами [Текст] / В.В. Гречухин. – Москва: Недра, 1980. – 360 с.
88. Глушко, В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях [Текст] / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланская. – Москва: Недра, 1987. – 278 с.
89. Захаров, В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений [Текст] / В.Н. Захаров. – Москва: ФГУП ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. – 172 с.
90. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – Москва: Наука, 1978. – 512 с.
91. Самарский, А.А. Теория разностных схем [Текст] / А.А. Самарский. – Москва: Наука, 1983. – 616 с.
92. Шуп, Т. Решение инженерных задач на ЭВМ [Текст] / Т. Шуп : Практическое руководство. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1982. – 238 с.: ил.
93. Рубан, А.Д. Контроль строения и состояния горного массива с использованием сейсмического мониторинга при подземной и открытой угледобыче [Текст] / А.Д. Рубан // Международная конференция. Геофизика и современный мир. – Москва, 1993. – С. 148.
94. Аки, К. Количественная сейсмология [Текст] / К. Аки, П. Ричарде // Теория и методы. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1983. – Т. 2. – 360 с.
95. Иванова Л.А., Кондратьева Т.Г., Щербо М.Н. Определение поглощения взрывных волн в грунте по записям напряжения и деформации // Изв. АН СССР. Физика Земли. – № 2 – 1970.
96. Халевин Н.И. Об импульсном интервальном звуковом каротаже // Изв. АН СССР. Геофиз. – № 3. – 1958.
97. Трубецкой К.Н., Малышев Ю.Н., Иофис М.А. Геомеханическое обеспечение разработки месторождений полезных ископаемых: Докл. на IX Международном конгрессе по маркшейдерскому делу. – Прага, 1994.

98. Методическое руководство по организации системы геомеханического мониторинга на карьерах и рудниках АК «АЛРОСА». – М.: ИПКОН РАН, 2002. – 47 с.

99. Орлов, Г.В. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки [Текст] / Г.В. Орлов, М.А. Иофис – Москва: МГИ, 1990. – 116 с.

100. Гришин А.В. Особенности изучения геомеханических процессов при комбинированной разработке крутопадающих месторождений // Деформирования и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVI Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2006. – С. 114–116.

101. Иофис, М.А. Гришин А.В. Геомеханический мониторинг при дискретном характере развития деформаций // Деформирования и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XV Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2005. – С. 114–116.

102. Гришин, А.В. Особенности измерения деформаций при дискретном характере их развития [Текст] / А.В. Гришин // Маркшейдерский вестник. – 2007. – № 2. – С. 43-45.

103. Исходная горно-геологическая и техническая информация по руднику «Мир» // г. Мирный, институт «Якутнипроалмаз», 2018. С. 36. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2018/01/Исходная-горно-геологическая-и-техническая-информация.docx>.

104. Белоусов, Ф.С. Изучение состояния пород переходных зон в условиях их естественного залегания методами шахтной сейсморазведки при комбинированной разработке кимберлитовых трубок [Текст] / Ф.С. Белоусов // Инженерная физика. – 2021. – № 1 – С. 49-56.