

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»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)

Научный руководитель

Аверин Андрей Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИПКОН РАН

Официальные оппоненты

Вознесенский Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ «МИСиС»,
Дорохин Кирилл Александрович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией геофизических исследований НИО ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН), г. Пермь

Защита диссертации состоится «16» июня 2021 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 в ФГБУН Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук

В.С. Федотенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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 прогноза 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 122 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 44 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель, задачи исследования, представлены основные научные положения и научная новизна, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного положения и проблем, возникающих при комбинированной разработке месторождений, основанных

на традиционной схеме нисходящей выемки запасов полезных ископаемых горизонтальными слоями с использованием твердеющей закладки. Для решения проблем техногенного характера, возникающих при такой системе разработки, необходимо создание методики мониторинга геомеханического состояния рудного массива и вмещающих пород переходной зоны. Для этого проанализированы геофизические и инклинометрические методы исследований, позволяющие оперативно отслеживать изменение геомеханического состояния переходной зоны.

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.

Проведен анализ результатов известных исследований, который показал перспективность применения методов сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии для контроля состояния массива горных пород (кимберлитов) переходной зоны (рис. 1). 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 достоверную информацию о тенденции развития геомеханических процессов в переходной зоне.

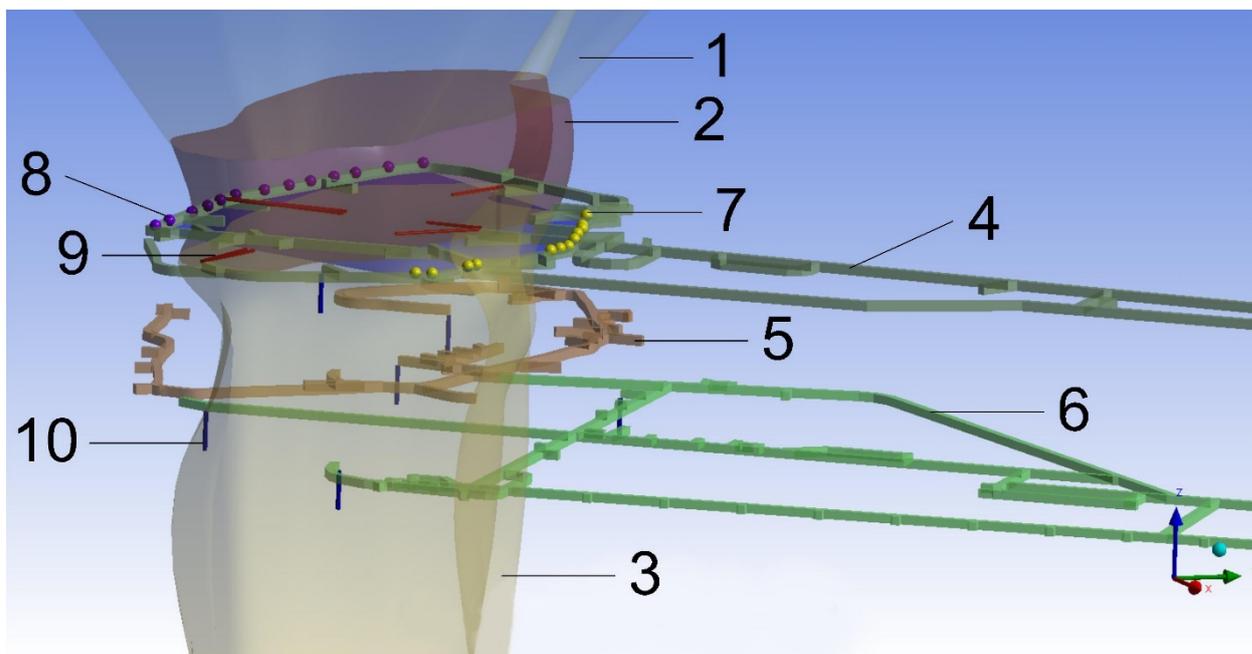


Рисунок 1. Схема проведения натуральных исследований на кимберлитовом месторождении: 1 – карьер; 2 – переходная зона; 3 – рудное тело; 4 – выработки горизонта -210 ; 5 – выработки горизонта -265 ; 6 – выработки горизонта -310 ; 7 – приёмники сигнала МСП; 8 – источники сигнала МСП; 9 – горизонтальные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

Проведенный анализ состояния изученности вопроса оценки строения, нарушенности и изменения во времени геомеханического состояния переходной зоны позволил сформулировать цель работы и задачи исследований для ее достижения.

Во **второй главе** рассмотрены методические и математические методы для проведения натуральных исследований с целью определения геомеханического состояния переходной зоны.

Геофизические методы исследований являются косвенными, т. е. основанными на взаимосвязи физико-механических свойств и состояния массива горных пород с геофизическими полями, но тем не менее они позволяют дать количественную и качественную оценку состояния массива с достоверностью, достаточной для прогноза его поведения при добыче руды.

Сейсмическое просвечивание проведено с целью определения изменений упругих свойств и выявления потенциальных областей (зон) развития вторичной трещиноватости в переходной зоне. Задача ультразвукового каротажа (УЗК) состоит в оценке горизонтально слоистого (трещиноватого) строения кимберлитов по построенным диаграммам распределения скоростей упругих волн. При обработке и интерпретации данных учитывались также физико-механические свойства. Инклинометрические исследования проведены для установления величин

деформаций подрабатываемого кимберлитового массива и характера их развития. В целом анализ выявил направление разработки методики мониторинга нарушенности переходной зоны при системе разработки под дном карьера, определяя её актуальность и значимость.

Основной целью геофизических исследований является оценка текущего состояния переходной зоны под дном карьера и картирование возможных областей развития вторичной трещиноватости. Для этой цели разработан опытный образец шахтной беспроводной сейсмостанции на базе автономного трехканального сейсмического регистратора (РСШ). Отсутствие соединительных кабелей позволяет выбирать любую схему расположения и шаг расстановки регистраторов, значительно уменьшить вес аппаратуры и исключить потерю данных с поврежденных участков кабелей. Комплект оборудования включает в себя 24 регистратора, 24 зонда и пульт синхронизации. Регистратор обладает 24-разрядным АЦП и 16-гигабайтным объемом памяти, что позволяет вести непрерывную автоматическую запись сигнала, возбуждаемого в массиве, не менее суток. Конструкция трехкомпонентного шпурового зонда позволяет обеспечить его правильную ориентацию в шпуре и установить прочный контакт зонда с породой за счёт применения пневмоприжима (рис. 2).



Рисунок 2. Сейсмостанция беспроводная шахтная

Проведенные исследования, направленные на разработку методики мониторинга нарушенности переходных зон под дном карьера, позволяют определять текущие геодинамические процессы и состояние массива горных пород по результатам комплексного анализа данных сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии. Разработанная аппаратура РСШ позволяет исследователям выбирать любую схему расположения и шаг расстановки регистраторов, предложенные технические решения обеспечивают надежную защиту регистрируемого сигнала от электромагнитных полей локальных электросетей, что значительно повышает

достоверность получаемых результатов и качество проводимых научных исследований.

В **третьей** главе рассматривается методика геофизических и инклинометрических опытно-промышленных работ в шахтных условиях, обработка и анализ результатов исследований.

Сейсмическое просвечивание осуществляется между горными выработками, оконтуривающими массив горных пород переходной зоны, не реже одного раза в год, в дальнейшем периодичность проведения исследований может быть изменена в зависимости от необходимости уточнения развития геомеханических процессов внутри исследуемого массива.

Пример схемы размещения источников и приёмников сигнала, сетки лучей для исследуемого горизонта приведён на рис. 3. Вдоль одного борта пробурены шпуры глубиной 1,5 метра и шагом 10 метров под трёхкомпонентные зонды (приёмники сигнала), вдоль другого – шпуры глубиной 0,2 метра и шагом 10 метров для капсулей-детонаторов (источник сигнала).

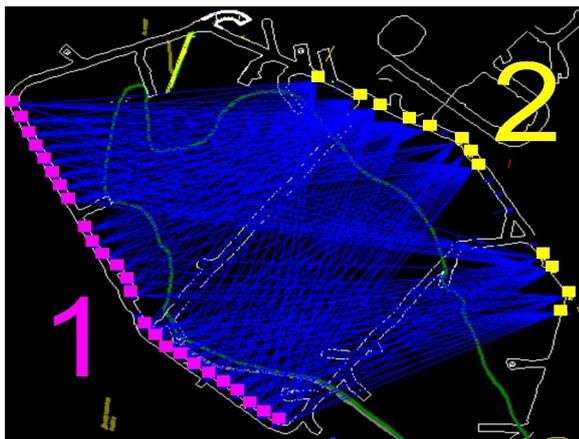


Рисунок 3. Схема размещения источников (1) и приёмников (2) сигнала, сетки сейсмических лучей на горизонте

Результаты сейсмического просвечивания обрабатываются в три этапа.

Первый этап заключался в выделении и идентификации полезных (информативных) волн. За счёт полосовой частотной фильтрации в диапазоне 150–550 Гц выделяются и коррелируются продольные и поперечные волны. По пройденному волной пути и времени пробега определяются значения скоростей упругих волн. На рис. 4 представлен пример регистрируемой волновой картины.

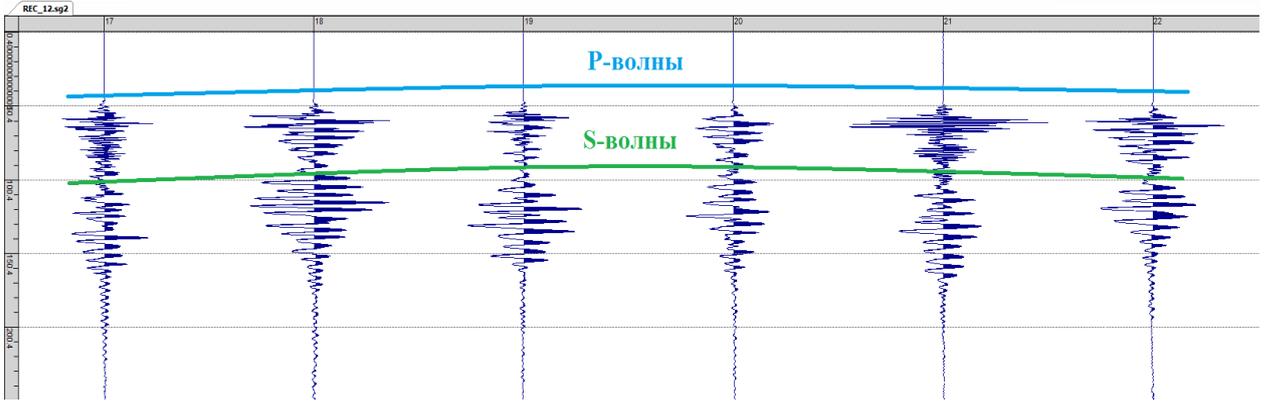


Рисунок 4. Пример регистрируемой волновой картины

Второй этап заключался в восстановлении скоростного строения массива методом реконструктивной сейсмической томографии.

На третьем этапе рассчитывается коэффициент Пуассона (ν , ед.) 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 V_p – скорость продольных волн, км/с; V_s – скорость поперечных волн, км/с.

На основе полученных данных вычисляется динамический модуль упругости ($E_{дин}$, ГПа) по известной формуле теории упругости:

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

где ρ – плотность кимберлита, т/м³.

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

Определены значения скоростей продольных и поперечных волн для каждой пары источник – приёмник (рис. 5–7).

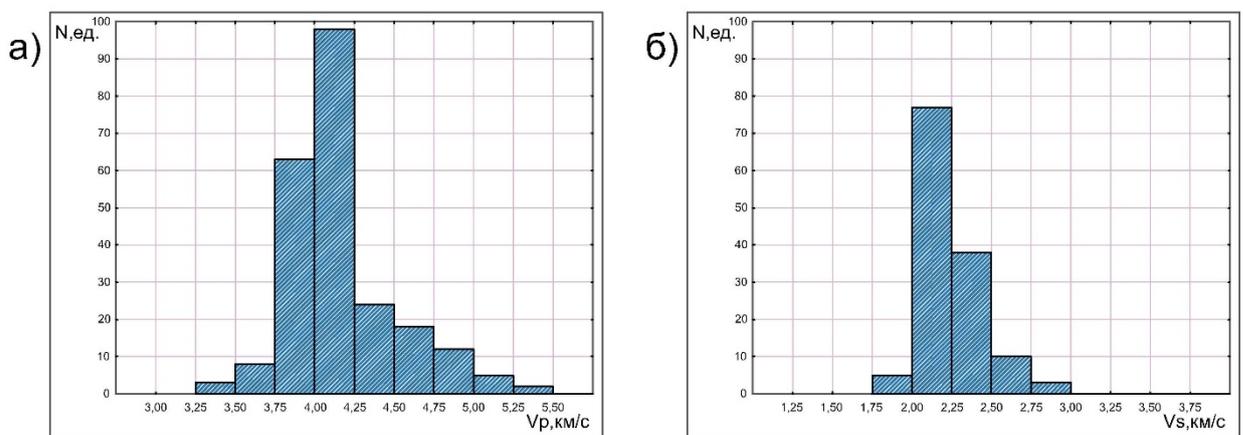


Рисунок 5. Распределение скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн по данным за первый год исследования

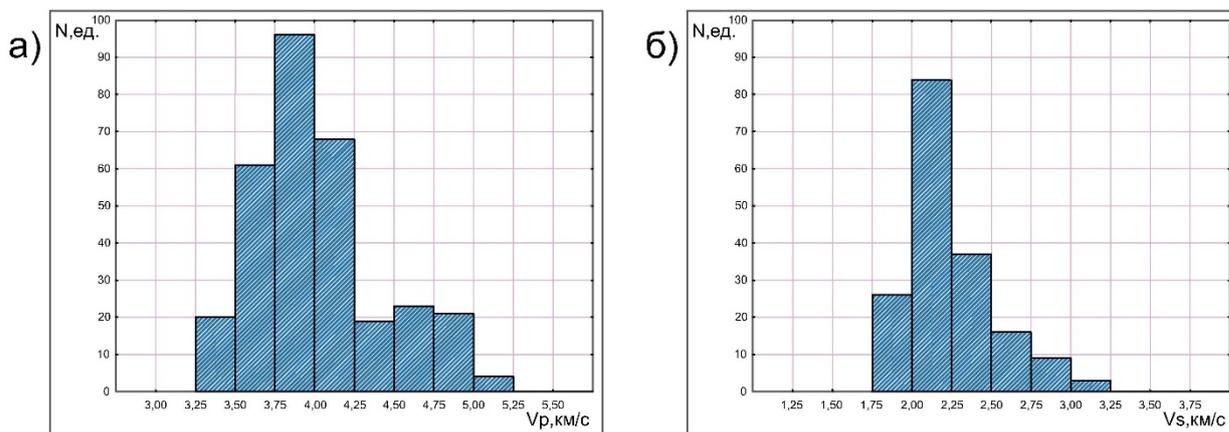


Рисунок 6. Распределение скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн по данным за второй год исследования

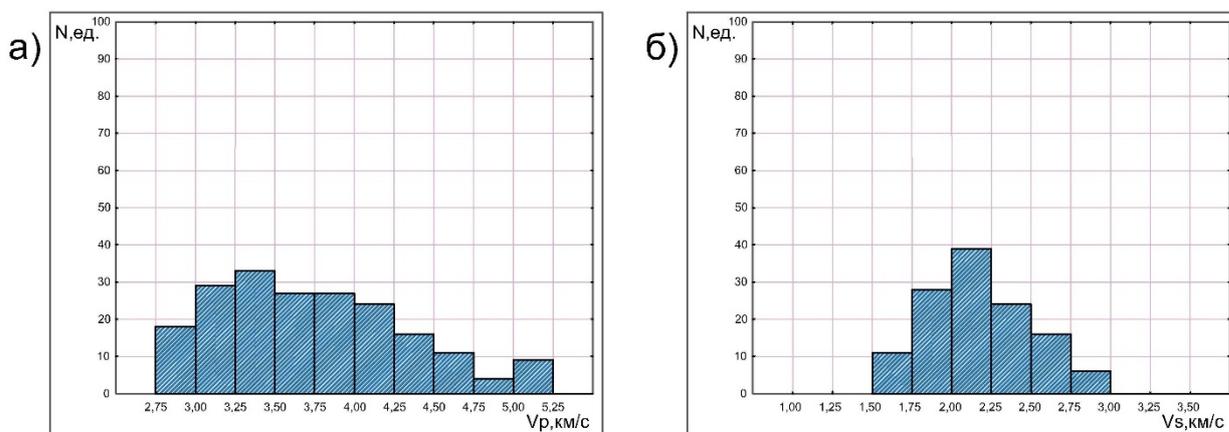


Рисунок 7. Распределение скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн по данным за третий год исследования

Сводные результаты по скоростям продольных и поперечных волн представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. 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 2. 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 |

Установлены снижения средних скоростей продольных и поперечных волн, процентное изменение которых за каждый из периодов измерений

уменьшалось практически одинаково. Разница между первым и вторым годом измерений составила более 3%, между вторым и третьим – более 6%. За весь период рассчитанные значения средних скоростей упругих волн упали почти на 10%. Возросло стандартное отклонение, указывающее на увеличение неоднородности упругих свойств кимберлитов переходной зоны.

Разрешающая способность и точность метода реконструктивной томографии при выявлении скоростной неоднородности среды напрямую зависит от плотности покрытия исследуемого массива лучевыми скоростями. В данном случае плотность покрытия исследуемого массива лучевыми скоростями поперечных волн не обеспечивает необходимую степень детализации томографической карты. Выделенные поперечные волны сосредоточены в центральной части массива и не позволяют рассчитать томографическую карту для всей его площади. Также усложняется анализ изменений скоростей поперечных волн за счёт порой невозможности их последующего выделения по тем же лучам источник – приёмник. Однако скорости поперечных волн приняты для расчёта коэффициента Пуассона. Полученный результат соответствует табличным значениям коэффициента Пуассона для кимберлитов. В дальнейшем с учётом рассчитанного коэффициента Пуассона были получены значения динамического модуля упругости.

По лучевым скоростям продольных волн методом реконструктивной томографии построены томографические карты свойств горных пород переходной зоны (рис. 8). В соответствии с работой Савича А.И. (Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1969), изменение скорости упругих волн более чем на 8–10% считается аномальным, что говорит об изменении свойств и/или состояния горных пород. Значения скоростей ниже средних на 10% ($V_p < 3,5$ км/с) приняты за аномальные и характеризующие возможные области трещиноватости массива.

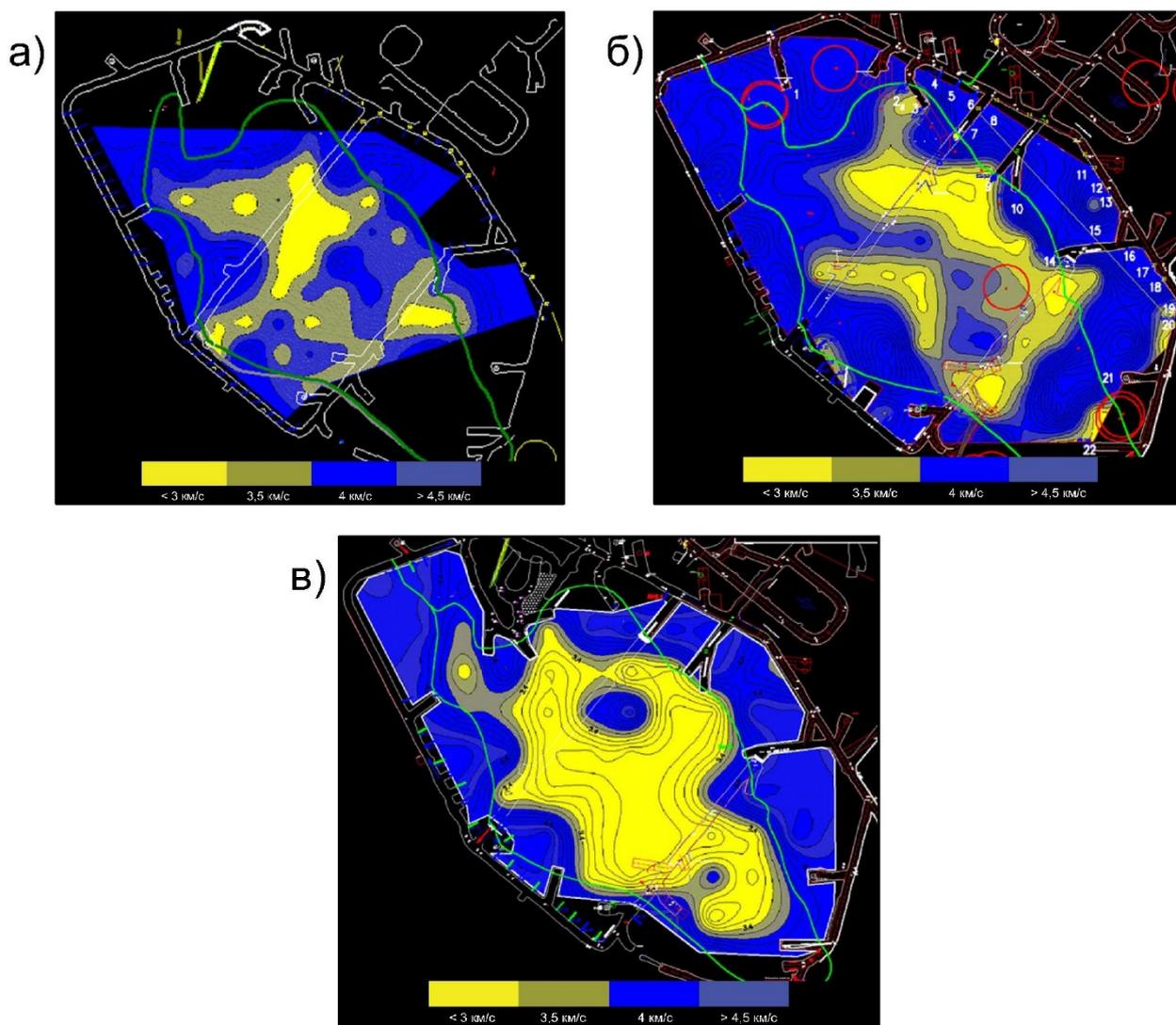


Рисунок 8. Результаты сейсмической томографии переходной зоны за первый (а), второй (б) и третий (в) годы исследований

По результатам первого и второго года исследований наблюдается перераспределение низкоскоростных областей, сопровождающееся изменением их форм, что, возможно, связано с нагнетанием тампонажных растворов. Применение тампонажа по состоянию на второй год подтвердило невысокую эффективность данных мероприятий.

Результаты статистической и томографической обработки указывают на значительное снижение упругих свойств кимберлитов переходной зоны и её ослабление в целом. Так, в первый и второй год наблюдалось перераспределение областей пониженных скоростей, оттенки желтого цвета на рис. 8, и происходило незначительное увеличение их площади. В третий год исследований зафиксирован значительный рост площади низкоскоростной области, развивающийся в направлении к оконтуривающим выработкам от центра рудного тела. За весь период наблюдений зафиксировано увеличение размеров области разрушения кимберлитов в переходной зоне под дном карьера на 86%.

Полученные значения динамического модуля упругости ($E_{дин}$) показывают также его общее снижение. Статистические распределения значений динамического модуля упругости приведены на рис. 9.

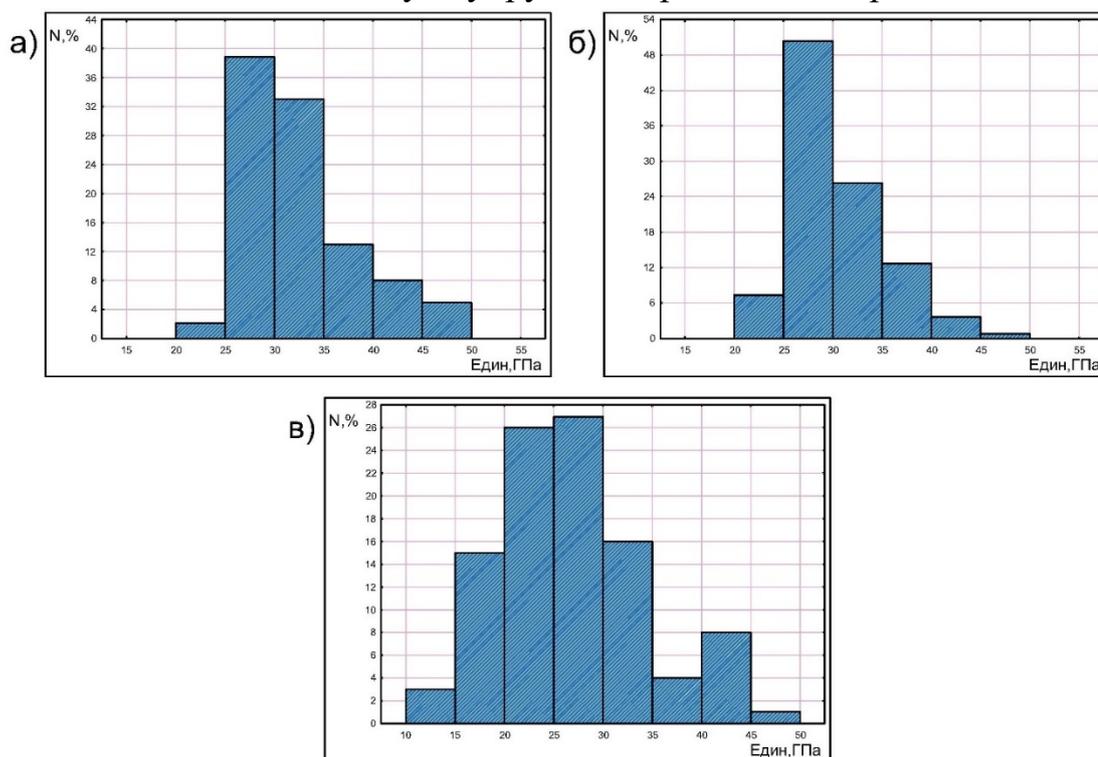


Рисунок 9. Распределение динамического модуля упругости по данным за первый (а), второй (б) и третий (в) годы исследований

Рассчитанные значения динамического модуля упругости ($E_{дин}$, ГПа) приведены в табл. 3. Уменьшение $E_{дин}$ 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%.

Таблица 3. Статистические параметры $E_{дин}$ (ГПа)

| №, год | Кол-во. изм., N, ед. | Скорость $E_{дин}$, 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 |

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что процентное уменьшение средних скоростей продольных и поперечных волн за каждый из периодов говорит об изменении упругих свойств и геомеханического состояния кимберлитового массива переходной зоны. Так, к третьему году измерений наблюдается уменьшение среднего значения скоростей упругих волн более чем на 10% в сравнении с первым годом. Анализируя полученные результаты сейсмической томографии за первый и

третий годы исследований, можно проследить значительное снижение упругих свойств кимберлитов в целом за счёт появления очагов трещиноватости.

Из таблицы 3 видно, что в первый год исследований среднее значение динамического модуля упругости 32,1 ГПа при распределении данного показателя в интервале $\sim 20 \div 50$ ГПа. Полученные результаты соответствуют значениям, рассчитанным в нетронутом рудном массиве, представленным в отчете АК «АЛРОСА» «Исходная горно-геологическая и техническая информация по руднику “Мир”», где среднее значение $E_{дин}$ находится в интервале 29,8÷35,4 ГПа. На третий год уменьшение $E_{дин}$ составило более 16% в сравнении с первым годом. Данное отличие является дополнительным подтверждением горизонтально слоистого (трещиноватого), сильно нарушенного строения кимберлитового массива переходной зоны.

Проведенный анализ научных работ и полученные результаты для оценки строения, определения областей нарушенности и фиксирования изменения во времени геомеханического состояния переходной зоны по скоростям продольных и поперечных волн обосновывают первое научное положение.

Исследование методом УЗК проводилось в первый год на горизонтах:

- 1) –210 в двух скважинах (28,2 м);
- 2) –265 в двух скважинах (38,2 м);
- 3) –310 в трёх скважинах (68,1 м).

В таблицах 4–7 представлены результаты измерений методом УЗК. На построенных диаграммах показан пример результатов кривых изменения V_p и V_s на интервале измерений 0,1 м (рис. 10).

Таблица 4. 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 5. 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 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 |

Таблица 7. 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 |

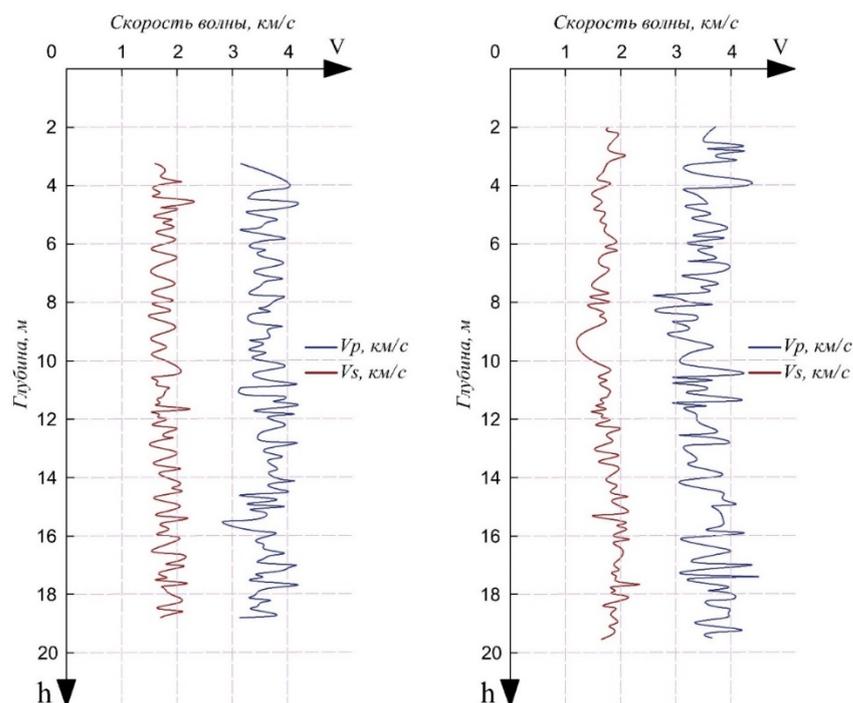


Рисунок 10. Каротажные диаграммы по данным УЗК (гор. –265 скв. 1, скв. 2)

При рассмотрении диаграмм отмечается сильная изрезанность графиков скорости продольной волны на интервале 0,2–0,4 м, что может свидетельствовать о горизонтальной слоистости (трещиноватости) рудного массива.

На горизонте –210 проведены инклинометрические исследования. Организованы наблюдательные станции, состоящие из горизонтальных скважин с размещёнными в них глубинными реперами, их местоположение

фиксировалось инструментальными измерениями с целью установления величин деформаций подрабатываемого кимберлитового массива и характера их развития. На рис. 11 цветными кривыми показаны деформации профиля инклинометрической скважины ($l_{скв}$, м) по оседанию (η , мм) реперов за 9 месяцев наблюдений.

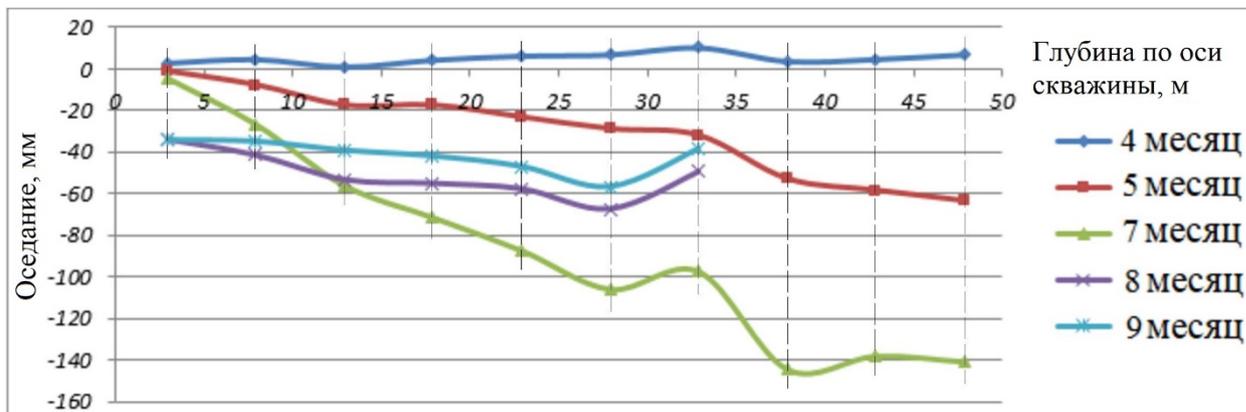


Рисунок 11. Пример оседания реперов профиля инклинометрической скважины №1

Система инклинометрического мониторинга, рассчитанная на выявление признаков, предшествующих проявлению критических деформаций, зафиксировала непосредственно эти деформации. Массив горных пород переходной зоны на момент начала наблюдений уже находился в нарушенном состоянии, в процессе проведения мониторинга под влиянием горных работ зафиксированы критические значения, что подтверждается смятием наблюдательных скважин на определенных участках. На инклинометрических скважинах зафиксированы максимальные оседания следующих значений: скважина №1 – 140 мм; скважина №4 – 130 мм; скважина №5 – 200 мм; скважина №6 – 200 мм; скважина №7 – 180 мм.

В результате инструментальных наблюдений сделан вывод, что процесс сдвижения и деформирования горных пород переходной зоны продолжается и после завершения закладочных работ на нижележащих горизонтах. Инклинометрические скважины зафиксировали, что слагающие переходную зону горные породы испытывает растяжение. На расстоянии 25–30 метров от контура рудного тела произошёл отрыв (или сдвиг, срез), показанный красной пунктирной линией на рис. 12.

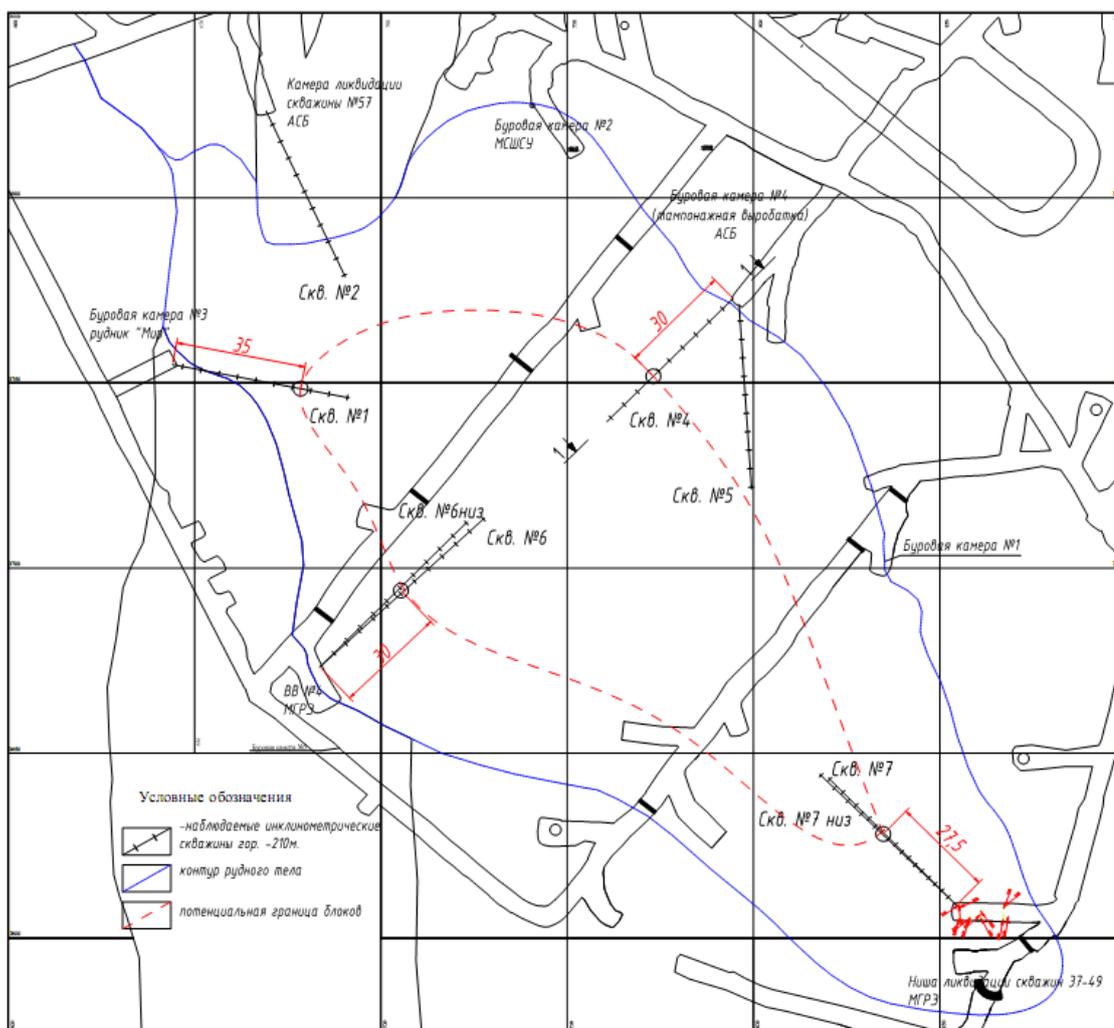


Рисунок 12. Схема расположения скважин и контура нарушенной области переходной зоны под дном карьера

При совмещении результатов методов сейсмического просвечивания и инклинометрии прослеживается совпадение контура областей пониженных скоростей продольных волн ($< 3,5$ км/с) и получившихся смятий на каждой из наблюдательных скважин (оседания реперов > 130 мм). На рис. 13 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 чем 10%. Полученные результаты говорят о возможности использования инклинометрического метода для подтверждения или уточнения результатов метода сейсмического просвечивания.

Проведены измерения методами сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии, результаты которых позволили рассчитать значения критических скоростей продольных волн и оседаний реперов профилей инклинометрических скважин с совпадением аномальных областей до 90–92%, что обосновывает второе научное положение.

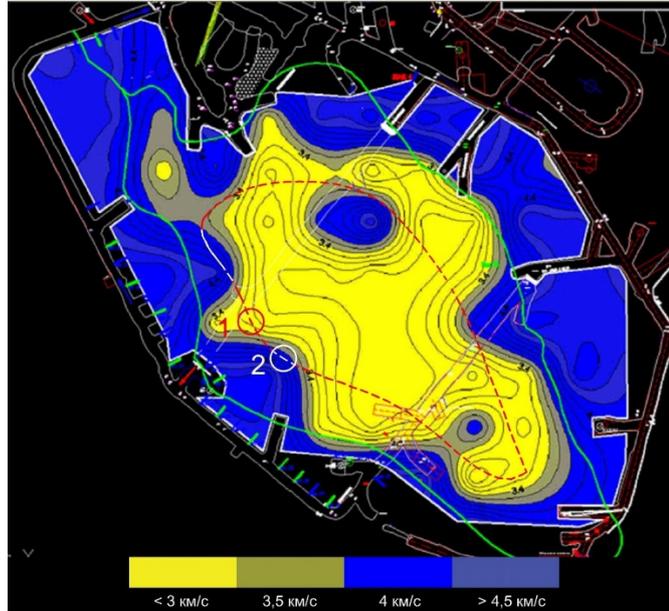


Рисунок 13. Совмещённая карта сейсмической томографии и инклинометрии с указаниями контуров совпадения (1) и расхождения результатов (2)

Для нахождения связи результатов измерений методов сейсмического просвечивания и инклинометрии проведен анализ зависимости скорости продольных волн от оседания инклинометрических скважин. Корреляционный анализ взаимосвязи $V_p = f(\eta)$ показал её высокую качественную характеристику по шкале Чеддока (коэффициент корреляции $r = 0,85$). Данная зависимость (рис. 14) описывается уравнением:

$$V_p = 0,0062\eta + 4,423 \quad (3)$$

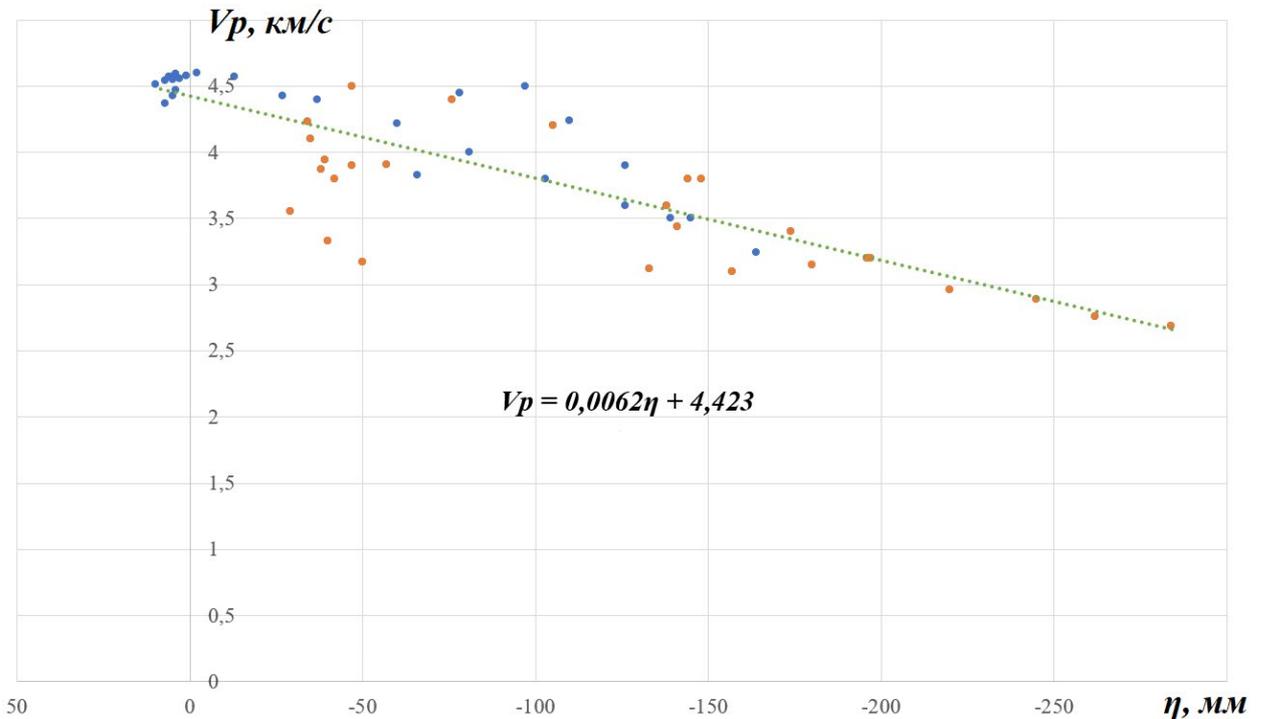


Рисунок 14. Корреляционная зависимость скорости продольных волн от оседания реперов инклинометрических скважин

Таким образом, значения скоростей продольных волн определяются через рассчитанные оседания инклинометрических 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, возникающие в рудном массиве, через результаты расчёта скоростей продольных волн методом УЗК.

Наблюдения по разработанной методике позволили установить, что исследуемый массив горных пород переходной зоны находится в нарушенном состоянии, о чём говорят выявленные области пониженных скоростей и участки с критическими значениями деформации. По результатам ультразвукового каротажа рудный массив на исследуемых участках представляет собой горизонтально слоистую (трещиноватую) среду, практически все трещины в кимберлитах мощностью от 1 мм до 7 см минерализованы, по исходным горно-геологическим данным рудника АК «АЛРОСА», основной заполнитель – галит.

Данный вывод подтверждается:

- 1) результатами измерения величин дискретного распределения деформаций массива горных пород переходной зоны и местами их локализации;
- 2) срезами и замятиями обсадки скважин этих участков;
- 3) за трёхлетний период измерений среднее значение динамического модуля упругости уменьшилось более чем на 16%.

В районе границы плоского дна мульды произошел отрыв (или сдвиг, срез) центральной части рудного тела на расстоянии 25–30 метров от её контура. Слагающие переходную зону горные породы в результате неравномерных оседаний подвергаются растяжению. По результатам сейсмического просвечивания на горизонте –210 выделяются области повышенной трещиноватости, указывающие на снижение упругих свойств кимберлитов переходной зоны и её ослабление в целом.

Зафиксировано снижение скоростей продольных и поперечных волн не менее 10% и динамического модуля упругости руды не менее 16%. Контуров областей разуплотнения кимберлитового массива, определенные по построенным картам распределения скоростей продольных волн, и установленная их связь с критическими значениями деформаций инклинометрических скважин на совмещенной карте для последующего анализа аномальных областей переходных зон обосновывают третье защищаемое положение.

Результаты исследования показали, что переходная зона находится в сильно нарушенном состоянии и представлена горизонтально слоистой

(трещиноватой) структурой. По имеющимся трещинам и разломам происходят основные сдвигения. Согласно циклу наблюдений, физико-механические свойства горных пород переходной зоны за время наблюдений снизились более чем на 10% по сравнению с первым годом исследований.

По итогам результатов проведенных теоретических и опытно-промышленных исследований обоснована и разработана новая методика мониторинга нарушенности переходных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений на основе комплексного анализа данных сейсмического просвечивания, ультразвукового каротажа и инклинометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой обоснована новая методика для решения научной задачи мониторинга свойств горных пород переходной зоны 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.

**Основное содержание диссертации опубликовано:
в научных журналах, рецензируемых ВАК России**

1. Закалинский В.М., Франтов А.Е., Аверин А.П., Белоусов Ф.С., Мингазов Р.Я. Система контроля воздействия взрывных импульсов на подземные выработки, ведущиеся в непосредственной близости от границ карьера // Маркшейдерия и недропользование. – М.: Геомар Недра, 2016. – № 4 (84) – С. 17–19.
2. Белоусов Ф.С. Сейсмостанция беспроводная шахтная // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, 2016. – № 11 – С. 361–364.
3. Аверин А.П., Франтов А.Е., Белоусов Ф.С. Исследование состояния горного массива геофизическими методами при комбинированной разработке кимберлитовых трубок // Инженерная физика. – НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ, 2019. – № 12 – С. 52–55.
4. Белоусов Ф.С. Изучение состояния пород переходных зон в условиях их естественного залегания методами шахтной сейсморазведки при комбинированной разработке кимберлитовых трубок // Инженерная физика. – НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ, 2021. – № 1 – С. 49–56.

в других изданиях и материалах конференций

1. Белоусов Ф.С. Трехкомпонентный шпуровой геофон // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материал 10-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: ИПКОН РАН, 2013. – С. 101–103.
2. Белоусов Ф.С. Регистратор сейсмоакустический шахтный // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материал 11-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: ИПКОН РАН, 2014. – С. 99–100.
3. Закалинский В.М., Франтов А.Е., Аверин А.П., Белоусов Ф.С., Мингазов Р.Я. Система сейсмического контроля воздействия массовых взрывов в

карьере на подземные выработки // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2016. – С. 63–67.

4. Аверин А.П., Белоусов Ф.С., Красюкова Е.В. Применение сейсмической аппаратуры для сравнительного анализа буровзрывных работ // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материал 13-й Международной научной школы молодых учёных и специалистов. – М.: ИПКОН РАН, 2016. – С. 222–225.

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

6. Аверин А.П., Белоусов Ф.С. Результаты сейсмического профилирования на выемочном участке угольной шахты // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2018. – С. 151–154.

7. Аверин А.П., Белоусов Ф.С. Расчет коэффициента проницаемости пород междупластья шахты им. Кирова на основе данных сейсморазведки // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2020. – С. 179–182.