

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

*На правах рукописи*

Зайцев Михаил Геннадьевич

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ СТРОЕНИЯ И  
СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ОС-  
НОВЕ СОВМЕСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ  
В СКВАЖИНАХ

2.8.3 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,  
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук

*Николенко Петр Владимирович*

Москва – 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Современное состояние геофизических методов изучения строения и состояния породного массива вблизи горных выработок .....	10
1.1 Контроль устойчивости горных выработок на основе анализа строения и состояния приконтурного массива .....	10
1.2 Геофизические методы изучения строения и состояния приконтурного массива пород.....	14
1.2.1 Дистанционные геофизические методы изучения строения и состояния приконтурного массива пород .....	15
1.2.2 Скважинные геофизические методы изучения строения и состояния приконтурного массива горных пород.....	21
1.3 Опыт совмещения ультразвуковых и оптических измерений при контроле строения и состояния горных пород на образцах и в массиве .....	31
Выводы к главе 1.....	34
2 Разработка принципов и аппаратного обеспечения для определения свойств горных пород на основе дискретных оптических измерений .....	38
2.1 Подготовка коллекции образцов горных пород .....	38
2.2 Изучение параметров трещин в горных породах на основе дискретных оптических измерений .....	46
2.2.1 Оценка помехового влияния цвета и степени шероховатости горной породы на результаты оптического выявления трещин .....	49
2.2.2 Контроль трещиноватости приконтурного массива пород на основе оптических измерений в скважинах.....	50
2.3 Оценка шероховатости поверхности горной породы оптическими методами	58
2.4 Оптическое определение типа горной породы .....	67

Выводы к главе 2.....	72
3 Проведение совместных акустических и оптических измерений на образцах горных пород.....	74
3.1 Влияние шероховатости породы на динамические и спектральные характеристики УЗ сигналов.....	74
3.2 Оценка влияния анизотропии и трещиноватости пород на параметры поперечных волн с изменяемым вектором поляризации .....	80
Выводы по главе 3 .....	87
4 Разработка аппаратного и методического обеспечения комплексного оптико-акустического каротажа скважин.....	89
4.1 Комплексный оптико-акустический каротажный комплекс .....	89
4.2 Проверка работоспособности оптико-акустического каротажного комплекса на физической модели скважины .....	91
4.3 Метод оптико-акустического каротажа приконтурного массива пород	96
Выводы по главе 4 .....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
Приложение А. Методика структурной диагностики массива пород вблизи горных выработок с использованием комплексного оптико-акустического каротажа .....	124
Приложение Б. Информация о практическом использовании результатов исследования .....	142

## ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

### *Акустические измерения*

- $V_p$ , м/с – скорость продольной волны;  
 $V_s$ , м/с – скорость поперечной волны;  
 $A_p$ , дБ – амплитуда продольной волны;  
 $A_s$ , дБ – амплитуда поперечной волны;  
 $t_p$ , с – время первого вступления продольной волны;  
 $t_s$ , с – время первого вступления поперечной волны;  
 $f_0$ , Гц – резонансная частота акустических преобразователей;  
 $\lambda$ , м – длина волны;  
 $E_d$ , Па – динамический модуль упругости;  
 $\Delta\omega_{эф}$ , Гц – эффективная ширина спектра;  
 $E$ , В – энергия сигнала;

### *Оптические и прочие параметры*

- $I$ , ед. АЦП – интенсивность отраженного от поверхности породы света;  
 $I_p$ , ед. АЦП – интенсивность отраженного от поверхности породы лазерного излучения;  
 $I_o$ , ед. АЦП – интенсивность отраженного от поверхности породы света в узком диапазоне длин волн;  
 $X_6, Y_6$ , ед. АЦП – координаты барицентров полярных диаграмм значений  $I_o$   
 $R_a$ , мкм – шероховатость поверхности;  
 $\alpha$ , град – угол падения трещины;  
 $\beta$ , град – угол простирания трещины;

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

В последние годы наблюдается тенденция к освоению месторождений полезных ископаемых на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях. При этом возрастает вероятность катастрофических явлений, связанных с проявлениями горного давления, а также возникновением геодинамических явлений. Это определяет актуальность совершенствования методов контроля состояния приконтурного массива.

На фоне несовершенства технологий контроля и мониторинга состояния конструктивных элементов систем разработки (использующиеся геофизические методы обладают низкой надежностью и часто представляют лишь качественную информацию) становится важной задачей создания новых, недорогих и эффективных методов контроля на основе комплексирования акустических и оптических измерений.

Использование акустического каротажа для оценки строения приконтурного массива пород связано с необходимостью получения корреляционных зависимостей между акустическими параметрами и типами пород. Как правило, такие зависимости получают на отобранных образцах. Подобная процедура крайне трудоемка и не гарантирует однозначной интерпретации результатов акустического каротажа *in-situ* из-за большого разброса свойств пород. Кроме того, акустические исследования, как правило, производят на максимально однородных образцах, что неизбежно приводит к масштабному эффекту при попытке переноса свойств образцов на свойства массива. В качестве достоинства акустического каротажа можно отметить возможность в отдельных случаях измерять глубину трещин. Однако при этом получить информацию об ориентации трещин оказывается невозможным. Кроме того, акустические натурные измерения крайне трудоемки и обладают низкой производительностью.

Использование видеокаротажа позволяет получать оперативную

информацию о виде внутренней поверхности скважины. Однако такая информация, как правило, является качественной, а ее интерпретация в значительной степени зависит от опыта оператора. Кроме того, часто поверхность массива не отражает его внутреннего строения (например, в результате бурения трещины имеют исключительно поверхностный характер или наоборот – после бурения значительные трещины оказываются невидны).

На данный момент попыток объединить формализованные результаты акустических и оптических измерений на основе математического аппарата корреляционного анализа в скважинах с целью повышения надежности и оперативности контроля приконтурного массива подтверждается отсутствием подобных исследований как в нашей стране, так и за рубежом.

Настоящая работа выполнялась при финансовой поддержке РФФ (проект №21-77-00046 «Разработка метода контроля строения и состояния приконтурного массива горных пород на основе совместных акустических и оптических измерений в скважинах для предотвращения катастроф техногенного характера при подземной добыче полезных ископаемых»).

**Цель работы** состоит в установлении влияния свойств и особенностей строения пород на результаты оптических и ультразвуковых измерений и разработке на этой основе комплексного оптико-акустического каротажного метода изучения состояния приконтурного массива пород.

**Идея работы** заключается в расширении возможностей и повышении надежности контроля строения и состояния массива горных пород вблизи горных выработок ультразвуковым методом за счет комплексирования его результатов с результатами оптического анализа поверхности измерительной скважины.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено, что определение угла падения и азимута простирания трещин, пересекающих измерительную скважину, возможно на основе измерения интенсивности отраженного света с помощью набора дискретных оптических датчиков, расположенных на плоскости, ортогональной оси

скважины и обращенных к ее стенкам. Наибольшая точность достигается при аппроксимации результатов оптических измерений с применением алгоритма взвешенных наименьших квадратов.

2. Доказано, что определение угла падения трещины, пересекающей измерительную скважину, возможно на основе анализа динамических информативных параметров сдвиговых волн ультразвукового диапазона частот с управляемым вектором поляризации.
3. Разработан алгоритм комплексирования результатов оптического сканирования и УЗ прозвучивания, позволяющий определять параметры трещин в случаях, когда ни один из этих методов не дает надежного результата, основанный на совместном анализе зарегистрированных в процессе каротажа интенсивностей отраженного света и амплитуд поперечных волн с изменяемым вектором поляризации.

**Научная новизна работы заключается в:**

- обосновании оптимальных параметров оптического сканирования для определения наличия и геометрических параметров трещин, пересекающих измерительную скважину;
- обосновании оптимальных технических и информативных параметров оптического определения степени шероховатости горной породы;
- установлении влияния шероховатости поверхности породы на параметры ультразвуковых сигналов, а также обосновании способов его снижения;
- установлении влияния наклона плоскости расположения трещины, пересекающей измерительную скважину, на амплитудные характеристики поперечных волн с переменным вектором поляризации;
- обосновании принципов совместного использования оптических и акустических методов с целью повышения надежности и оперативности оценки структуры и состояния приконтурного массива пород.

**Методы исследований** включают: анализ и обобщение научно-технической информации; теоретический анализ потенциальных

возможностей и информативных параметров при проведение совместных акустических и оптических измерений; лабораторный эксперимент на образцах горных пород различного типа; статистическую обработку полученных данных.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются** достаточным объемом совместных экспериментальных акустических и оптических измерений, выполненных в лабораторных условиях; удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных результатов; применением современных вычислительных методов; использованием при проведении лабораторных исследований технических средств с высокими метрологическими характеристиками.

### **Практическая значимость и реализация результатов**

В рамках диссертации разработана «Методика структурной диагностики массива пород вблизи горных выработок с использованием комплексного оптико-акустического каротажа». Её применение позволяет повысить достоверность прогноза устойчивости выработок при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. Методика принята ООО «Газпром геотехнологии» при проектировании и создании подземных шахтных хранилищ.

### **Апробация работы**

Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены на научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2023 г.), 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых ИПКОН РАН (Москва, 2021), «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать пятая международная конференция, посвященная 300-летию Российской академии наук». (Москва, 2024).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России и индексируемых в Scopus.

**Структура и объем работы.** Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 148 источников, содержит 44 рисунка и 5 таблиц.

# **1 Современное состояние геофизических методов изучения строения и состояния породного массива вблизи горных выработок**

## **1.1 Контроль устойчивости горных выработок на основе анализа строения и состояния приконтурного массива**

Обеспечение устойчивости горных выработок и других подземных сооружений играет ключевую роль в горнодобывающей промышленности и строительстве. Это не только важнейший аспект безопасности, но и основа для достижения высокой эффективности эксплуатации. Высокая устойчивость конструкций снижает риски обрушений, защищая жизни работников и минимизируя ущерб оборудованию. Устойчивость подземных сооружений — это результат комплексного подхода, включающего грамотное проектирование, применение современных технологий укрепления и постоянный мониторинг состояния пород.

Потеря устойчивости является следствием комплекса причин и, как правило, приводит к частичному или полному обрушению. Обрушения горных выработок представляют серьёзную опасность, приводя к травматизму, гибели людей и значительным экономическим потерям. Основными причинами таких аварий являются нарушения в системе «крепь — вмещающие породы», перераспределение горного давления, изменение напряжённо-деформированного состояния пород и другие факторы [1,2,3]. Статистические данные показывают, что обрушения руды и вмещающих пород составляют значительную долю от общего числа происшествий при подземной разработке полезных ископаемых [4]. Часто такие аварии происходят в местах сопряжения подготовительных и очистных выработок, при уборке породы или оформлении забоев.

Вид потери устойчивости в значительной степени определяется параметрами системы разработки полезных ископаемых и используемыми способами крепления пород. Так, при камерно-столбовой системе разработки основным механизмом потери устойчивости является механизм разрушения целиков, сопровождающийся постепенным повышением уровня их структурной

нарушенности. Ярким примером обрушения целиков можно считать серию обрушений в нескольких шахтах на востоке Соединенных Штатов [5,6]. Еще одним механизмом потери устойчивости является сейсмическое воздействие, часто имеющее техногенный характер [7,8,9]. Проблемы обеспечения устойчивости также характерны и для железобетонных крепей [10], для которых проявления горного давления могут приводить к образованию трещин в самой крепи, а также нарушению качества контакта «крепь-порода».

Обеспечение устойчивости горных выработок и подземных сооружений является ключевым фактором их безопасной и эффективной эксплуатации. Этот процесс включает широкий спектр мероприятий, направленных на предотвращение обрушений и минимизацию последствий возможных деформаций. Основные подходы включают тщательное проектирование крепи, использование современных компьютерных технологий и инструментальные методы контроля.

Проектирование способов крепления выработок играет центральную роль в обеспечении устойчивости подземных сооружений. На этапе проектирования проводятся анализ горно-геологических условий, исследуются физико-механические свойства пород, наличие трещиноватости, уровень горного давления и другие факторы, влияющие на устойчивость. В зависимости от условий эксплуатации и характеристик горных пород выбираются типы крепи — железобетонные, анкерные, металлические или комбинированные. Разрабатываются модели, позволяющие учитывать статические и динамические нагрузки, такие как землетрясения, вибрации от оборудования и взрывное воздействие [11,12,13]. Комплексный подход к проектированию включает использование стандартов и регламентов, а также рекомендации, основанные на анализе уже существующих объектов.

Современные компьютерные технологии позволяют значительно повысить точность расчётов и прогнозов. Анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) с помощью таких программ, как FLAC3D [14,15], ANSYS [16] или Abaqus [17,18] позволяет моделировать сложные геомеханические

процессы, происходящие в массиве пород вокруг выработки. Моделирование помогает определить наилучшие параметры крепи, такие как длина анкеров, толщина железобетонных конструкций и шаг установки элементов. Сценарии моделирования позволяют предсказать вероятные зоны риска и предложить меры по их устранению. Однако наряду с очевидными широкими возможностями современных систем проектирования их надежность во многом базируется на фактической информации о состоянии подземного объекта, получаемой *in-situ* с применением различных инструментальных методов контроля.

Инструментальные (экспериментальные) методы контроля за состоянием подземных сооружений являются важной составляющей частью системы мониторинга устойчивости. Одним из важных направлений контроля является контроль за деформационными процессами, происходящими в выработках. Методы контроля включают деформационные измерения с использованием тензорезистивных [19], струнных [20] и фотоупругих [21,22] датчиков для измерения напряжений в крепи и породах, а также наблюдение за осадкой и сдвигами конструкций. Подобные измерения, как правило, характеризуются относительно высокой точностью, однако высокая трудоемкость и стоимость их реализации в натуральных условиях часто является причиной отказа от их применения. Подобные измерения используют специфические аппаратные решения, а также, при размещении датчиков в скважинах, предъявляет высокие требования к буровому оборудованию. Оптимальным решением считается использование деформационных измерений для создания систем длительного мониторинга за ответственными участками подземных сооружений. В этом случае затраты на проведения измерений можно считать оправданными.

Другим направлением инструментального контроля является изучение параметров трещиноватости массива. Трещиноватость горных пород — это совокупность трещин, разрывов и других нарушений сплошности, которые формируют сеть в массиве горных пород. Трещины могут быть вызваны различными процессами, включая тектонические движения, изменения температуры, выветривание и механические нагрузки [23,24]. Их наличие

существенно влияет на физико-механические свойства пород и является ключевым фактором при проектировании и эксплуатации подземных сооружений и шахт. Трещины в горных породах классифицируются по ряду признаков: по происхождению, по форме и ориентации, по размеру и по степени заполненности. По происхождению выделяют тектонические трещины, которые образуются в результате движения литосферных плит и тектонических напряжений, термальные трещины, возникающие из-за температурных изменений, которые приводят к расширению и сжатию пород, трещины выветривания, формирующиеся под воздействием химических и физических факторов выветривания, а также эксплуатационные трещины, которые появляются при добыче полезных ископаемых или строительстве [25,26].

По форме и ориентации трещины могут быть плоскими, имеющими простую геометрию и однородные параметры, извилистыми, характеризующиеся сложной формой, что затрудняет их анализ, а также различными по ориентации к земной поверхности. По размеру трещины делятся на микротрещины, видимые только под микроскопом, и макротрещины, различимые невооруженным глазом и оказывающие значительное влияние на устойчивость. По степени заполненности они могут быть открытыми, то есть без заполнения, или заполненными раздробленной породой, глиной или водой. Параметры трещиноватости, такие как частота, длина, ширина, ориентация и степень заполненности, играют важную роль в проектировании и эксплуатации подземных сооружений. Трещины являются зонами ослабления, которые могут приводить к снижению прочности и устойчивости массива горных пород [27]. Их ориентация и размер определяют вероятность обрушений. Трещиноватость также влияет на проницаемость пород, что важно для предотвращения подтопления шахт и других подземных объектов. В условиях сейсмической активности трещины могут становиться очагами разрушений, усиливая риск обрушения [28,29,30].

Самым распространенным методом контроля параметров трещиноватости можно считать визуальный осмотр поверхности выработок. С примером

удачной методики такого обследования можно ознакомиться в работе [31]. Неоспоримым преимуществом подобного метода контроля является низкая трудоемкость, оперативность и сравнительно невысокие требования к аппаратурному обеспечению. В последнее время получили широкое развитие методы, дополняющие визуальное обследование с фотофиксацией элементами автоматизированной обработки изображений [32,33,34]. Все указанные работы отмечают высокую производительность такого контроля. Однако очевидно, что информация, получаемая с поверхности обнажения выработки, не в полной мере характеризует строение и состояние массива пород. В зависимости от способа проходки вокруг выработки формируется нарушенная зона (Excavation disturbed zone, EDZ) различной мощности. В этой зоне происходит наложение полей естественной и техногенной трещиноватости, что препятствует точному определению свойств трещин за пределами EDZ. Кроме того, очевидно, что наблюдение за поверхностью обнажения не позволяет изучать изменение параметров трещиноватости в глубине массива – в зоне опорного давления и за ее пределами. Для более детального изучения строения и состояния породного массива вблизи горных выработок обычно используются различные геофизические методы.

## **1.2 Геофизические методы изучения строения и состояния приконтурного массива пород**

С точки зрения схем реализации геофизические методы можно разделить на две основные группы – скважинные и методы дистанционного зондирования. Последние предполагают проведение измерений параметров различных физических полей без прямого вмешательства в конструктивные элементы подземных сооружений. Очевидно, что подобные методы с первого взгляда являются предпочтительными. К методам дистанционного зондирования относятся методы георадиолокации и метод регистрации электромагнитной эмиссии (ЭМИ).

### **1.2.1 Дистанционные геофизические методы изучения строения и состояния приконтурного массива пород**

Георадиолокация (Ground Penetrating Radar, GPR) представляет собой неразрушающий геофизический метод, использующий электромагнитные импульсы (12 МГц — 2,5 ГГц) для исследования структуры и свойств горных пород. Этот метод нашел широкое применение в подземных сооружениях, таких как шахты, рудники и тоннели, для контроля трещиноватости и анализа строения массива горных пород. Принцип работы георадиолокации основан на отражении электромагнитных волн от границ сред с разными диэлектрическими свойствами. Основные этапы метода включают излучение сигнала, когда антенна передает электромагнитный импульс в исследуемую среду. Затем волны проникают в массив горных пород, частично отражаясь от границ с изменением диэлектрической проницаемости. После этого приемная антенна фиксирует временные задержки и амплитуды отраженных сигналов, которые затем обрабатываются для расчета глубины залегания границ и оценки свойств среды, используя амплитуду сигналов [35,36].

На эффективность метода влияют несколько ключевых параметров, таких как диэлектрическая проницаемость, определяющая скорость распространения волн в породе, электрическая проводимость, которая сказывается на затухании сигнала, и частота излучаемого сигнала, высокие значения которой обеспечивают лучшее разрешение, но меньшую глубину проникновения. Применение георадиолокации в подземных условиях требует учета специфики таких сооружений, как шахты, рудники и тоннели. Этот метод позволяет определять положение, размеры и ориентацию крупных трещин, а также мониторить их развитие для оценки устойчивости массива [37,38]. Георадиолокация позволяет выявлять зоны повышенной трещиноватости, которые могут представлять опасность, и помогает в изучении строения массива, включая локализацию границ между различными геологическими слоями, поиск зон разуплотнения или участков с измененной структурой пород, а также определение толщины и характеристик перекрывающих пород [39]. Кроме того,

метод используется для мониторинга состояния крепей и оценки их взаимодействия с горным массивом, что способствует безопасности подземных сооружений, включая обнаружение скрытых полостей и водоносных горизонтов [40].

Однако подземные условия накладывают определенные ограничения на использование метода. Высокая электропроводность пород, например, в условиях насыщения водой или наличия минералов с высокой проводимостью (сульфиды), снижает эффективность георадиолокации. Кроме того, ограниченное пространство в подземных сооружениях не всегда позволяет разместить крупные антенны, что требует использования компактных устройств. Работа оборудования вблизи техники и других источников электромагнитного излучения может ухудшить качество данных, а неровности поверхности тоннелей требуют адаптации антенн для работы на грубых и неравномерных поверхностях [41,42]. Еще одним серьезным ограничением указанного метода является снижение его разрешающей способности с увеличением глубины зондирования. Отдельным направлением можно считать использование георадиолокационного метода в скважинном исполнении [43]. В этом случае удастся повысить разрешающую способность, однако теряется основное достоинство метода – бесконтактный неразрушающий вид измерений.

Метод ЭМИ является важным инструментом, используемым для контроля состояния горных пород и оценки трещиноватости в подземных сооружениях, таких как шахты, рудники и тоннели. Этот метод основан на регистрации и анализе слабых электромагнитных волн, которые возникают в процессе деформации или разрушения горных пород. Под воздействием внешней силы, например, при приложении нагрузки или при изменении условий в горных породах, появляются микротрещины, которые вызывают изменение в электрических и магнитных свойствах материала. Электромагнитные импульсы, как правило, имеют широкий спектр частот и могут быть использованы для получения информации о характере трещиноватости и состоянии массива пород. Кроме того, такие импульсы могут иметь различные параметры, зависящие от

типа породы, её структуры и прочности, что позволяет не только выявлять трещины, но и оценивать их размеры и расположение [44,45].

Особенности применения метода электромагнитной эмиссии в подземных условиях определяются несколькими факторами, связанными с геологической и технологической спецификой. Во-первых, подземные условия характеризуются высокой влажностью, что может повлиять на распространение электромагнитных волн и качество их регистрации [46]. Во-вторых, сложная структура массива пород и наличие различных типов горных пород (глины, песчаники, известняки, и др.) могут влиять на эффективность метода, поскольку разные материалы имеют разные электрофизические характеристики [47]. Кроме того, в подземных условиях наличие различных источников помех, таких как оборудование, насосы или транспортные системы, может затруднить точную регистрацию сигналов электромагнитной эмиссии. Поэтому часто требуется использование высокочувствительных приборов, а также методов фильтрации и обработки сигналов, чтобы минимизировать влияние шумов и получить достоверную информацию о трещиноватости [48].

В целом метод ЭМИ характеризуется исключительно высокой производительностью, однако его результаты носят интегральный характер и часто подвержены влиянию многочисленных помеховых факторов.

Часто к дистанционным геофизическим методам изучения строения и состояния приконтурного массива относят методы, которые предполагают проведение измерений на поверхности обнажения. Подобные методы, безусловно, не являются в полной мере дистанционными, однако для них справедливо основное достоинство дистанционных - отсутствие необходимости бурения скважин и нарушения сплошности крепи при ее наличии. К подобным методам относятся методы резонансный сейсмоакустический метод, сейсмическое профилирование, звуковая локация со свободной поверхности, метод акустической эмиссии (АЭ), а также различные контактные электрометрические методы.

Резонансный сейсмоакустический метод предназначен для изучения слоистых структур и позволяет до определенной степени оценивать геометрические и плотностные параметры пород в слоистых массивах. Основы резонансного метода описаны в работах [49,50]. Суть метода заключается в спектральном анализе сейсмоакустических импульсов, распространяющихся в слоистых средах и поиске локальных резонансных явлений, соответствующих возникновению так называемого эффекта «толщинного резонанса» - возникновения стоячих волн в пласте. По положению резонансных пиков судят о толщинах слоев, а по их ширине – о механических параметрах горных пород. Метод демонстрирует ограниченную эффективность, наиболее подходящим направлением его применения является уточнения параметров массива в кровле выработок [51,52]. Физические основы метода, однако, препятствуют его использованию для определения параметров трещиноватости приконтурного массива.

Различные варианты сейсмического профилирования получили широкое применение для оценки строения и состояния приконтурного массива на масштабе десятков и сотен метров. Метод основан на анализе распространения сейсмических волн через горные породы, что позволяет получать информацию о структуре массива, его механических свойствах и наличии дефектов, таких как трещины, пустоты и другие аномалии. Физические основы метода заключаются в возбуждении сейсмических колебаний в горных породах и последующем анализе зарегистрированных в различных точках волновых форм. При этом в качестве информативных параметров используется весь спектр кинематических, динамических и спектральных характеристик сигналов [53].

Особенности применения метода сейсмического профилирования в подземных условиях связаны со сложными условиями работы. Во-первых, подземные сооружения часто имеют ограниченные размеры и сложную геометрическую форму, что затрудняет установку оборудования для генерации и регистрации сейсмических волн. Кроме того, шумы и вибрации, возникающие в процессе работы, могут влиять на точность получаемых данных.

В работе [54] рассматриваются особенности проведения сейсморазведки в условиях шахт. Предложена методика разделения отражений, приходящих из разных полупространств, что позволяет более точно определять характеристики горных пород и выявлять зоны повышенной трещиноватости. Авторы указывают на возможность повышения разрешающей способности метода при использовании поперечных волн с более короткой длиной волны.

Успешный пример использования сейсмического метода при опережающем контроле проходки горной выработки представлен в работах [55,56]. Показана возможность выявления ослабленных зон вдоль трассы проходки, однако разрешающая способность метода ограничена довольно большими длинами волн, измеряемыми метрами. Повышение разрешающей способности возможно с помощью увеличения частот сейсмических колебаний, а также при размещении геофонов и источника сигнала в измерительных скважинах (по аналогии со скважинным вариантом георадиолокации) [57]. В этом случае, однако, также теряется основное преимущество дистанционных геофизических методов.

В целом, сейсмические методы демонстрируют высокую эффективность при решении задач поиска крупных структурных неоднородностей – разломов, зон повышенной трещиноватости, зон дробления. Однако частотный диапазон используемых колебаний не позволяет изучать трещины по-отдельности, определять их ориентацию в пространстве, раскрытие, материал заполнения и другие важные геотехнические параметры.

Для выявления неоднородностей в окрестностях выработок может быть применен метод акустической и ультразвуковой локации с использованием свободной поверхности, реализуемый в звуковом или ультразвуковом диапазоне частот. Метод отличается относительной простотой реализации, однако его широкому применению препятствует его основной недостаток – разрешающая способность метода резко падает с увеличением глубины зондирования. Несмотря на это, определенный опыт его применения для оценки строения приконтурного массива описан в работах [58,59].

Более широкое распространения получил метод акустической (сейсмо-акустической) эмиссии. На масштабах десятков метров такой метод реализуется в виде сейсмических измерений, реализуемых в пассивном режиме. В этом случае в качестве источника сигнала используются природные шумы, возникающие при деформации массива и перестройке структуры его дефектности под действием механических напряжений [60,61,62]. Несмотря на сложности в обработке сигналов и их интерпретации, метод позволяет выявлять зоны структурных нарушений, активные тектонические разломы, а также зоны локальных концентраций напряжений. Вместе с этим ему присущи те же недостатки, что и методу сейсмического профилирования – низкая разрешающая способность и невозможность анализа параметров отдельных трещин.

Наряду с низкочастотным вариантом, в практике геоконтроля используется и высокочастотный вариант акустико-эмиссионного метода [63,64]. Повышение частот регистрируемых акустических импульсов значительно повышает разрешающую способность метода, позволяя, фактически, анализировать сигналы, соответствующие росту отдельных трещин. Однако при этом проникающая способность таких сигналов оказывается крайне мала и анализу обычно подвергается относительно небольшой объем пород в непосредственной близости от точки регистрации.

Частично задачу исследования строения приконтурного массива можно решить с применением электрометрических методов. Электрометрический метод представляет собой один из способов исследования и контроля трещиноватости и строения массива горных пород в подземных сооружениях, таких как шахты, рудники и тоннели. Основой метода является изучение электрических свойств горных пород, которые изменяются в зависимости от их состава, структуры, влажности и наличия трещин. Физические основы электрометрического метода связаны с явлением проводимости и поляризации, возникающими в породах под воздействием электрического поля [65]. Эти явления обусловлены движением ионов в поровой жидкости, а также

электропроводностью твердых фаз минералов, что позволяет выявлять различия в свойствах пород в различных частях массива.

В подземных условиях применение электрометрического метода имеет свои особенности и сложности, связанные с влиянием высоких уровней влажности, неоднородностью массива и наличием металлических конструкций. Одним из ключевых преимуществ данного метода является возможность проведения исследований без разрушения массива, что особенно важно в условиях ограниченного пространства подземных сооружений [66]. Исследование проводится путем создания электрического поля в массиве горных пород и регистрации потенциалов, токов или других параметров, отражающих электрическое состояние среды. В зависимости от поставленных задач могут использоваться различные модификации метода, такие как метод сопротивлений [67,68], вызванной поляризации [69] или естественного электрического поля [70,71].

Описанные выше геофизические дистанционные геофизические методы характеризуются примерно одинаковым набором достоинств и недостатков. В качестве достоинств можно указать оперативность проведения контроля, отсутствие необходимости в бурении скважин, получение информации об больших объемах пород. Однако для всех рассмотренных методов характерна интегральная оценка пород – ни один из них не позволяет определять свойства отдельных трещин, изучать их ориентацию, раскрытие и материал заполнения.

Более детальную картину могут дать методы изучения строения и состояния массива, реализуемые в виде скважинных измерений по схемам каротажа или межскважинных исследований.

### **1.2.2 Скважинные геофизические методы изучения строения и состояния приконтурного массива горных пород**

Принципиальное отличие скважинных методов исследования заключается в существенном повышении точности и разрешающей способности измерений за счет использования скважин, пересекающих исследуемый объем

породного массива. Вне зависимости от физической основы применяемого метода общая схема измерений заключается в дискретном или непрерывном перемещении измерительного прибора вдоль скважины и регистрации одного или нескольких информативных параметров используемых физических полей. При этом результат измерений представляет собой разрез массива, ориентированный вдоль оси скважины.

Среди основных скважинных геофизических методов исследований приконтурного массива можно выделить метод электроемкостного каротажа, инфракрасной радиометрии, метод совместных акустико-эмиссионных и ЭМИ измерений, телевизионного и акустического каротажа.

Суть метода электроемкостного каротажа заключается во введении в скважину емкостного зонда, который создает электрическое поле в окружающем массиве. Измеряя реакцию среды на это поле, можно определить структурные особенности массива, такие как трещины, межслоевые контакты и зоны разуплотнения. Большой вклад в разработку метода внесен В.Ю. Дагаевым и описан в работе [72]. Основным ограничением для применения указанного метода является отсутствие оптимальных аппаратных решения, которые позволили бы производить электроемкостные измерения сразу на нескольких частотных диапазонах.

Использование инфракрасного излучения для поиска зон локального уплотнения пород под действием напряженного состояния можно проследить в работах В.И. Шейнина [73,74]. Несмотря на убедительные экспериментальные результаты метод на данный момент не получил широкого распространения из-за ограничений решаемых им задач и несовершенства аппаратного обеспечения.

Интересный опыт оценки устойчивости горных выработок на основе совместных акустико-эмиссионных и ЭМИ измерений описан в работах А.С. Вознесенского, В.В. Набатова, В.Л. Шкуратника и Я.О. Куткина [75,76]. Приведены результаты скважинных измерений с применением оригинального аппаратного комплекса, показана корреляция между акустическими и

электромагнитными сигналами в зонах концентрации напряжений в столбчатых целиках. Однако метод является интегральным и не предназначен для изучения параметров отдельных трещин.

Описанные выше скважинные методы нашли свое применение для изучения отдельных параметров приконтурного массива, однако большинство из них не предназначены для картирования трещин и определения механических свойств пород. На сегодняшний день основными используемыми методами каротажа приконтурного массива пород безусловно являются методы телевизионного и ультразвукового (УЗ) каротажа.

### **1.2.2.1 Опыт применения телевизионного каротажа для изучения параметров трещиноватости массива пород вблизи горных выработок**

Оптический каротаж, также известный как видео- или телевизионный каротаж, представляет собой метод исследования стенок скважин с использованием оптических систем, позволяющий получать детальные изображения внутренней поверхности скважины. Этот метод особенно эффективен для анализа трещиноватости, определения ориентации пластов и других структурных особенностей горных пород. Для проведения оптического каротажа обычно используются специальные зонды, оптимизированные для работы в необсаженных скважинах, пробуренных с дневной поверхности. Оптический зонд оснащен обычно камерой с широкоугольной линзой, обеспечивающей обзор на 360° вокруг оси зонда. В ряде случаев вместо одной камеры используется серия радиально направленных камер, изображение с которых «сшивается» программным путем при постобработке. При спуске зонда в скважину камера непрерывно фиксирует изображения стенок. Полученные данные оцифровываются и синхронизируются с показаниями датчиков ориентации, что позволяет создавать развернутые панорамные изображения стенок скважины. Для получения качественных изображений скважина должна быть заполнена

чистой водой или быть сухой, так как наличие мутной жидкости или масла может ухудшить качество съемки.

На сегодняшний день на рынке представлены модели разнообразных видеокаротажных систем. Сред них каротажные системы QL40 OBI-2G [77], OPTV52(G) [78], GD-C1201 [79], НИС-200 [80], ПВКСС [81], ТАИС [82]. Основные технические характеристики видеокаротажных систем сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Современные модели телевизионных скважинных каротажных систем

<b>Зонд</b>	<b>Производитель</b>	<b>Диаметр скважины (минимальный), мм</b>	<b>Система позиционирования</b>
QL40 OBI-2G	ООО «ЛНК-ГЕО»	50	Магнитометр и акселерометр
OPTV52(G)	ТОО "Абсолют Пресижн ЦА"	60	Магнитометр и акселерометр
GD-C1201	AGT	30	-
НИС-200	ТОО «ГЕОДЕВАЙС КАЗАХСТАН»	150	-
ПВКСС	ООО «Техногео»	100	-

Все описанные системы объединяет единый принцип работы, заключающийся в получении фото или видео изображений стенки скважины. При этом процесс регистрации является высокопроизводительным и относительно простым, однако обработка изображений представляет собой сложную задачу, во многом опирающуюся на субъективный опыт оператора. Обработка видеофайлов требует сложной синхронизации видеоряда и пространственного положения зонда. Обработка фотоизображений также требует учета ориентации зонда (которая частично может быть решена в случае использования встроенных в зонд систем отслеживания ориентации), а также ручного или полуавтоматического выделения трещин на изображении и оценки их пространственных углов ориентации. Также следует принять во внимание, что результат видеокаротажа обычно представляется в виде фотоизображения развертки скважины. В случае, если одновременно с видеокаротажем производятся

исследований другими каротажными методами, не существует никаких способов математического комплексирования результатов их применения. Также следует принимать во внимание, что все описанные системы спроектированы для работы с дневной поверхностью и использование их в горизонтальных или вертикальных скважинах в кровле потребует значительной доработки, изготовления досыльно-ориентирующих устройств и др.

Вопрос точности видеокаротажных измерений является неоднозначным. Многие производители акцентируют внимание на разрешении матрицы видеокамер зонда, однако конечным результатом работы таких систем являются определенные параметры положения трещин – углов падения и простирания. На их определение влияет точность определения положения зонда, точность субъективного выделения трещины на фотоизображении скважины, качество поверхности скважины в области пересечения ее трещиной и др. У некоторых производителей указаны точности определения углов, которые колеблются в диапазоне 1-2 градуса.

Основной опыт использования видеокаротажных систем сосредоточен в области измерений в водозаполненных скважинах, пробуренных с дневной поверхности [83,84,85]. Вместе с этим есть и опыт применения телевизионных исследований в шахтных условиях в горизонтальных и наклонных необводненных скважинах [86].

В целом, можно утверждать, что с точки зрения производительности контроля и точности определения пространственных параметров трещин видеокаротаж можно считать наиболее эффективным геофизическим методом. Однако вместе с этим существует ряд принципиальных ограничений. В первую очередь необходимо учитывать указанную выше трудоемкость и сложность обработки видеоизображений. Также совершенно очевидно, что видеокаротаж, являясь бесконтактным, не может представить никакой информации о физико-механических свойствах пород. Кроме того, геометрические параметры трещин надежно определяются только в случае отчетливого выхода трещин на поверхность скважины, а при бурении скважин часть трещин

может оказаться забитой пылью и буровой мелочью. Принципиально дополнительную информацию по строению и состоянию приконтурного массива можно получить при использовании ультразвукового каротажа.

### **1.2.2.2 Опыт применения ультразвукового каротажа для изучения строения и состояния массива пород вблизи горных выработок**

Использование упругих колебаний является основой подавляющего числа геофизических методов исследования массивов горных пород. Большую часть из них занимают различные вариации сейсмических методов. Однако и высокочастотные методы заняли прочное место при решении целого ряда задач определения упругих характеристик и строения пород на малых масштабах с высокой точностью. Основой таких методов являются ультразвуковые скважинные методы, в частности ультразвуковой каротаж. Основным принципом метода является использование упругих волн ультразвукового диапазона частот, которые распространяются через породу, взаимодействуют с её структурами, а затем фиксируются специальным оборудованием. Упругие волны могут быть как продольными, так и поперечными, и их скорость распространения зависит от плотности и упругости материала породы, а также степени её дефектности. Когда ультразвуковая волна проходит через породу, часть её энергии отражается от неоднородностей, таких как границы слоев с различной плотностью или трещины, что позволяет определить свойства этих элементов [87].

На сегодняшний день исследователями накоплен значительный опыт применения ультразвуковых методов исследования горных пород, теоретически обоснованы основные схемы их реализации и используемые информативные параметры. В нашей стране существенный вклад в эту область внесен Ватолиной Е.С., Воларовичем М.П., Вознесенским А.С., Глушко В.Т., Голяминой И.П., Даниловым В.Н., Ермоловой И.Н., Мамбетовой Ш.А., Николенко П.В., Кажиса Р.И., Козыревым А.А., Меркуловой В.М., Паниным В.И., Рубаном А.Д., Савичем А.И., Силаевой О.И., Турчаниновым И.А., Тютюнником

П.М., Шкуратником В.Л., Ямщиковым В.С. и др. учёными. Среди зарубежных ученых необходимо отметить работы Liu, Y., Li, Y., Qiao, L., Fan, D., Sun, H., Belhaj, H., Tao, G., Vega, S., Liu, L. и др.

Ультразвуковые исследования в приконтурной области массива производятся по двум схемам – межскважинного прозвучивания и каротажа. Межскважинное прозвучивание позволяет получать информацию об относительно большом объеме пород, находящемся между измерительными скважинами [88]. К сожалению, подобная схема не нашла широкого применения из-за высоких требований к бурению близкорасположенных параллельных скважин. Большее распространения получили каротажные измерения

В общем случае схема ультразвукового каротажа подразумевает излучение и прием ультразвуковых импульсов, распространяющихся в относительно тонком слое пород, сопоставимым с длиной волны используемых импульсов [89]. В большинстве случаев анализу подвергаются кинематические, динамические и спектральные характеристики зарегистрированных импульсов.

Скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) упругих волн являются ключевыми параметрами при исследовании горных пород. Измерение этих скоростей позволяет определить динамические модули упругости, а также оценить прочностные и плотностные свойства пород [90,91,92]. Отдельные примеры использования скоростей продольных волн для оценки пористости пород можно проследить в работах [93,94]. При реализации измерений в приконтурном массиве в «сухих» скважинах кинематические характеристики являются основными из-за особенностей обеспечения контакта «преобразователь-порода».

Вторым важным набором информативных параметров являются динамические характеристики. Амплитуда (затухание) сигналов широко используется для оценки пористости, анизотропии, плотности и других физических характеристик и параметров строения массива пород [95,96]. К сожалению, использование динамических параметров, зачастую более чувствительных к порам и трещинам, должно базироваться на концепции обеспечения постоянства

параметров передачи ультразвуковой энергии от зонда к породам и обратно. На сегодняшний день такое постоянство можно гарантировать только в скважинах, заполненных жидкостью.

Еще одним важным набором информативных параметров является набор спектральных характеристик. Одним из базовый спектральных параметров является частота максимума спектра  $f_{\max}$ , использование которой для оценки параметров трещины обосновано в работах [97,98]. Двумерный спектральный анализ также используется для оценки фильтрационных свойств пород при реализации ультразвукового каротажа [99]. Оценка ширины спектра может использоваться в качестве параметра оценки свойств материала, в том числе его трещиноватости [100]. В значительной степени спектральные параметры также привязаны к качеству контакта преобразователя с массивом, т.к. неплотный контакт может выступать как фильтр нижних частот.

Совершенно отдельным можно считать вариант ультразвукового каротажа с использованием непрерывных шумовых зондирующих сигналов и их последующей корреляционной обработки. Основной вклад в это направление внесен А.А. Кормновым [101]. В работе [102] приведено обоснование принципов проведения такого каротажа, в качестве основных информативных параметров указываются интервал корреляции сигнала  $\tau_k$ , а также параметры взаимно корреляционной функции  $B(\tau)$ . В работах [103,104] приведены примеры применения метода для выявления трещин в кровле горных выработок по результатам реализации ультразвукового каротажа в необводненной скважине. Также показана принципиальная возможность производить оценку величин механических напряжений в породах [105]. В целом, описываемый подход на сегодняшний день является наиболее эффективным для оценки параметров трещиноватости породного массива при проведении каротажных измерений в сухих скважинах.

При анализе опыта применения ультразвукового каротажа для исследования приконтурного массива пород невозможно обойти вниманием устройства возбуждения и приема акустических колебаний. В большинстве случаев

частоты акустического каротажа лежат в диапазоне 40 - 500 кГц. В этом диапазоне наиболее эффективным способом взаимного преобразования электрических и механических колебаний является использование пьезоэлектрических преобразователей. Для ультразвуковых каротажных измерений, производимых с дневной поверхности в разведочных скважинах, характерна передача упругих колебаний через заполняющую скважину жидкость (воду или буровой раствор) [106,107,108]. В этом случае, как правило, используются цилиндрические преобразователи, скрытые в герметичном корпусе. Жидкость, окружающая зонд, является отличной средой для передачи продольных волн, контактные условия «преобразователь - порода» остаются оптимальными и постоянными на протяжении всего времени проведения измерений. Отличительной особенностью проведения ультразвукового каротажа в измерительных скважинах, пробуренных из горных выработок, является отсутствие в них жидкости, обеспечивающей оптимальный акустический контакт. В этом случае приходится использовать так называемый «сухой» акустический контакт, сопровождающийся пневматическим прижимом преобразователей к стенке скважины. Подобный контакт можно рассматривать как существенный помеховый фактор [109], поскольку его низкая повторяемость существенно влияет на энергию акустического импульса, передаваемого от преобразователя к массиву пород. Частично снизить влияние такого контакта возможно за счет оптимизации формы и площади используемого протектора преобразователя. Удачное решение для ультразвукового каротажного зонда описано в работе [110]. Также повысить повторяемость контактных условий возможно с помощью управления давлением пневмоприжима, однако эффективность такого подхода остается ограниченной [111]. Кроме того, следует четко понимать, что использование пневматического прижима существенно замедляет процесс каротажа, поскольку каждое перемещение зонда на новую точку измерения должно сопровождаться сбросом давления пневмосистемы и его последующим повышением после смещения зонда на следующую точку измерения. Также следует принимать во внимание, что на данный момент в

необходимых скважинах используются исключительно преобразователи продольных волн. Использование преобразователей для генерации и приема поперечных волн (например, серийно производимого S1802 0.05A0D2PS с точечным контактом [112] или с плоским протектором [113]) могло бы существенно расширить возможности каротажа, однако на сегодняшний день подобных аппаратурных решений не разработано.

Отдельным направлением скважинных акустических измерений можно считать применение так называемых скважинных телевьюеров (borehole televiewer). Подобные устройства представляют собой инструменты, используемые для визуализации стенок скважин в процессе бурения или анализа. Эти устройства используют акустические импульсы, генерируемые пьезоэлектрическим преобразователем, который также выступает в качестве приёмного и принимает отраженные сигналы от стенок скважины. Основная задача таких зондов — измерение времени прохождения сигнала и амплитуды отражений, что позволяет определить геометрические характеристики поверхности стенок скважины и прилегающих горных пород. Акустические телевьюеры работают как в прозрачных (водонаполненных), так и в непрозрачных (заполненных буровым раствором) средах, однако они не применяются в воздухонаполненных скважинах, так как акустическая энергия плохо распространяется в газообразной среде. С помощью таких устройств можно получить изображения высокой разрешающей способности, включая данные о геометрии скважины, наличии трещин, пористости и других структурных особенностях.

Современные акустические телевизионные зонды используют цифровую обработку данных, что позволяет в реальном времени получать и анализировать изображения. Новейшие разработки включают технологии динамической фокусировки преобразователей, что обеспечивает более четкое отображение стенок даже в условиях сложной геометрии скважины. Высокая частота сигналов (от 195 кГц до 2 МГц) обеспечивает горизонтальное разрешение до 1 мм, при этом вертикальное разрешение в значительной степени зависит от скорости перемещения зонда в скважине [114].

Первые разработки в этой области появляются в конце 1960-х годов с появлением первых телевьюеров, позволивших производить измерения в скважинах, заполненных буровым раствором [115]. Более поздние разработки позволили решать задачи, включающие определение структуры пород, анализ и оценку трещин (естественных или индуцированных) [116], изучение пористости [117], выявление отклонений в форме скважины, контроль цементного кольца, а также детальное измерение параметров обсадной колонны [118]. Эти устройства также применяются для оценки напряжений в породах вокруг скважины [119], что важно для предотвращения обрушений и проектирования устойчивых скважин.

Использование скважинных телевьюеров безусловно является перспективным направлением изучения строения породных массивов. Однако этому методу присущ ряд существенных недостатков. Во-первых, высокие частоты, используемые для получения изображений высокого разрешения, препятствуют глубокому проникновению УЗ колебаний в породу. Во-вторых, метод реализуется по схеме отраженных волн. В этом случае получение информации о физических свойствах породы оказывается весьма ограниченным, фактически сводясь к анализу коэффициента отражения. И в-третьих – обязательное наличие жидкости в скважине делает полностью невозможным применение указанного метода в горизонтальных скважинах или скважинах, пробуренных в кровле горных выработок.

### **1.3 Опыт совмещения ультразвуковых и оптических измерений при контроле строения и состояния горных пород на образцах и в массиве**

Совмещение результатов оптических и акустических измерений является перспективным направлением развития неразрушающих методов контроля массивов горных пород. Оптические методы характеризуются оперативностью и большим объемом получаемой информации о поверхности породы. Однако о внутреннем строении в этом случае можно судить на основе

косвенных признаков и предположении о том, что наблюдаемые на поверхности особенности строения и дефекты сохраняют свои характеристики и при удалении от контура скважины. С другой стороны, более полную информацию о внутреннем строении пород как раз могут предоставить акустические методы. При этом для адекватного совмещения результатов акустических и оптических измерений должен соблюдаться принцип равного масштаба – объем изучаемых пород и разрешающая способность должны быть сопоставимы для акустических и оптических измерений. В этом случае из всех акустических методов для комплексирования с оптическими в наибольшей степени подходят ультразвуковые.

Одним из активно развивающихся направлений на сегодняшний день является совмещение ультразвуковых и оптических измерений при изучении деформационных процессов и разрушения образцов горных пород в лабораторных условиях. При этом оптические измерения используются в качестве бесконтактной оценки деформации на поверхности образца (оптической тензометрии) [120]. Получение оптической информации производится посредством установки специальной видеокамеры на штатив напротив деформируемого образца с нанесенным на его поверхность специальным рисунком. Деформации в точках получают с применением корреляционной обработки последовательности кадров, снятых в процессе нагружения образца. Подобный же принцип реализован при изучении деформационных процессов на бортах карьеров [121]. Одновременно с оптической тензометрией производится ультразвуковой прозвучивание образца. Результаты совмещаются для выделения зон пластических деформаций и наблюдения за развитием трещин. Подобный лабораторный метод является весьма перспективным, однако требует тщательной подготовки и специального оборудования. Перенос измерений на натурные условия на данном этапе развития этого метода невозможен.

Опыт совместного анализа результатов акустического и оптического сканирования стенок скважины описан в работе [122]. В исследовании приводятся результаты сканирования водозаполненных скважин сначала с

применением ультразвукового телевьюера, а затем с применением скважинного видеозонда. Совместный анализ заключается в параллельном изучении изображений, полученных обоими методами. Отмечается, что границы трещин и локальных разрушений стенок скважины лучше выявляются на оптических изображениях. С другой стороны, акустические изображения дают дополнительную информацию о глубине каверн и общем профиле скважины. Следует отметить, что совместный анализ в этом случае носит субъективный анализ и зачастую сильно зависит от опыта оператора. Аналогичный анализ, но уже с применением большего количества геофизических исследований скважин описан в работе [123].

Более сложные алгоритмы совместной обработки ультразвуковых и оптических измерений приведены в недавней работе [124]. В этом случае фотоизображения стенок скважины синхронизируются с результатами съемки акустическим телевьюером для дальнейшей математической обработки с применением вейвлет преобразований. Результатом применения такого комплексирования является более надежное выявление ослабленных границ между геологическими структурными элементами. Следует отметить, что математическая комплексная обработка производится фактически с двумя растровыми изображениями, возможность получения которых появляется только при использовании акустического телевьюера в вертикальных водозаполненных скважинах. Таким образом предлагаемый метод является безусловно перспективным, однако область его применения довольно ограничена.

Анализ современных публикаций в области комплексирования оптических и ультразвуковых измерений показывает, что основным вектором развития таких подходов является приведение результатов обоих измерений к растровому формату и последующему их совместному анализу. Однако такой подход применим только для ультразвуковых систем, в которых реализуется принцип непрерывного сканирования, таких как акустические телевьюеры. На сегодняшний день не существует примеров комплексирования результатов

телевизионного обследования сухих скважин и результатов дискретных ультразвуковых измерений каротажными зондами.

## **Выводы к главе 1**

В результате анализа современных методов изучения строения и состояния породных массивов в горнодобывающей промышленности и строительстве подземных сооружений можно сделать несколько ключевых выводов. Обеспечение устойчивости горных выработок во многом зависит от перераспределения горного давления, изменений напряженно-деформированного состояния пород и нарушений в системе «крепь – вмещающие породы». Эти факторы требуют применения комплекса методов для снижения рисков обрушений, что напрямую влияет на безопасность работников и экономическую эффективность предприятий. Крепь горных выработок должны проектироваться с учетом специфики геологических условий, при этом высокая трещиноватость пород значительно усложняет задачи по обеспечению устойчивости, что требует использования инструментальных методов контроля. Среди методов изучения приконтурного массива выделяются дистанционные и скважинные. Дистанционные методы, такие как георадиолокация, сейсмическое профилирование и акустическая эмиссия, позволяют оперативно собирать данные и минимизировать вмешательство в структуру массива, однако имеют ограничения, связанные с точностью при оценке отдельных трещин и низкой разрешающей способностью в целом. Скважинные методы, такие как оптический и ультразвуковой каротаж, дают более детализированные данные о состоянии массива, позволяя выявить ориентацию трещин, их размеры и физико-механические свойства пород. Тем не менее, эти методы также имеют свои ограничения, такие как необходимость обеспечения акустического контакта и сложности при работе в непрозрачной среде заполнителя скважины. Перспективы комплексирования методов, например, совмещение оптического и ультразвукового каротажа, открывают возможность сочетать оперативность получения данных о поверхности пород с подробной информацией о внутреннем

строении, но на данный момент перенос таких технологий в полевые условия ограничен техническими трудностями и отсутствием обоснованных подходов для комплексирования оптических измерений и дискретного каротажа сухих скважин. В таблице 1.2 приведен обобщенный анализ геофизических методов изучения строения и состояния массива горных пород в окрестностях горных выработок.

Таблица 1.2 – Классификация геофизических методов изучения строения и состояния массива горных пород в окрестностях горных выработок

Метод	Разрешающая способность	Область применения	Ограничения
<b>Дистанционные методы</b>			
Георадиолокация	Десятки сантиметров, метры	Выявление отдельных крупных трещин, границ между породами с контрастными электрическими свойствами	Низкая разрешающая и проникающая способность. Невысокая точность определения параметров отдельных трещин
Метод ЭМИ	Метры, десятки метров	Выявление зон концентраций напряжений и активного проявления деформационных процессов	Только интегральная оценка, низкая точность, низкая помехоустойчивость
Резонансный сейсмоакустический метод	Метры	Оценка структуры слоистых сред, изучение контакта «крепь-порода»	Решается узкий круг задач
Сейсмическое профилирование	Десятки метров	Изучение крупных структурных нарушений и свойств пород	Низкая разрешающая способность
Акустическая локация	Десятки метров	Выявление зон концентрации напряжений, мониторинг динамических явлений	Низкая разрешающая способность, измерения только в режиме мониторинга
Электрометрические методы	Метры	Изучение обводненности массива, выявление крупных структурных нарушений	Низкая разрешающая способность, сложность реализации в шахтных условиях
<b>Скважинные методы</b>			
Электроемкостной каротаж	Сантиметры	Выявление трещин, пересекающих скважину	Несовершенство аппаратного обеспечения, сложность оценки параметров отдельных трещин
Термокаротаж	Сантиметры	Выявление зон локального уплотнения пород	Узкий круг решаемых задач, несовершенство аппаратного обеспечения
Совместный АЭ-ЭМИ каротаж	Десятки сантиметров	Оценка концентрации напряжений вдоль скважины	Принципиальная невозможность изучения отдельных трещин
Телевизионный каротаж	Миллиметры	Оценка ориентации и раскрытия трещин, литологическое расчленение массива	Измерения только в прозрачных средах. Информация только о поверхности скважины
Ультразвуковой каротаж	Сантиметры	Оценка упругих свойств пород. Выявление координат трещин, пересекающих скважину	Невозможность определения раскрытия и наклона трещин. Высокая трудоемкость измерений в сухих скважинах
Скважинные телевьюеры	Миллиметры	Выявление трещин, измерение углов наклона и иногда раскрытия	Работа только в скважинах, заполненных жидкостью

Из таблицы 1.2 следует, что наиболее перспективным направлением изучения строения и состояния приконтурного массива является комплексирование двух методов, обладающих наибольшей разрешающей способностью – оптического и ультразвукового каротажа. При работе в сухих горизонтальных или наклонных скважинах ультразвуковой каротаж может быть реализован только в дискретном виде, а его результаты представлены в виде каротажной кривой изменения определённого информативного параметра. В этом случае его комплексирование с растровым изображением оптического каротажа оказывается невозможным. С другой стороны, можно предположить, что приведение результатов оптического каротажа к одной или набору каротажных кривых позволило бы произвести такое комплексирование, в том числе с использованием корреляционной обработки. Однако в этом случае потребовалось бы разработать специализированное оптическое оборудование, в основе которого лежат не растровые цифровые камеры, а наборы дискретных оптических датчиков, направленных на измерение одной или нескольких оптических характеристик поверхности скважины в точке измерения [125].

Таким образом, на основании проведенного в настоящей главе анализа, были сформулированы следующие основные задачи диссертационного исследования:

1. Произвести анализ современного опыта инструментального исследования строения и состояния приконтурного массива пород.
2. Сформировать коллекцию образцов горных пород, обладающих различными акустическими свойствами, дефектами и особенностями подготовки поверхности.
3. Разработать электронные модули для оптического сканирования стенок скважины.
4. Разработать алгоритмы обработки оптической информации с целью определения особенностей строения прискважинного массива и параметров шероховатости.

5. Экспериментально установить влияния угла между вектором поляризации сдвиговых волн и плоскостью трещины на динамические характеристики регистрируемых колебаний.

6. Разработать аппаратное обеспечение комплексного оптико-акустического каротажа, а также обосновать основные принципы совместной обработки результатов ультразвукового прозвучивания и оптического сканирования.

7. Проверить работоспособность предлагаемых решений на физической модели скважины.

8. Разработать методику структурной диагностики пород вблизи горных выработок с использованием комплексного оптико-акустического каротажа.

## **2 Разработка принципов и аппаратного обеспечения для определения свойств горных пород на основе дискретных оптических измерений**

### **2.1 Подготовка коллекции образцов горных пород**

Проведение первичных лабораторных исследований целесообразно производить на специально подготовленных образцах горных пород. При этом образцы должны отличаться различным цветом, определяемым минеральным составом, быть различных генотипов. Кроме того, должны быть представлены породы с изотропным составом, а также с ярко выраженной анизотропией свойств, определяемой слоистой структурой. Отдельно должны быть подготовлены образцы, содержащие дефекты – трещины. Поверхности образцов должны характеризоваться различной степенью шероховатости. С точки зрения удобства проведения совместных оптических и акустических измерений образцы должны иметь плоскопараллельные границы. Таким образом оптимальной формой для образцов являются параллелепипед. Именно такой формы были изготовлены образцы из следующих пород.

Оникс кальцитовый – декоративная осадочная порода, состоящая преимущественно из кальцита. Имеет слоистую структуру с чередованием полупрозрачных и непрозрачных слоев, часто встречаются оттенки белого, кремового, зеленоватого и коричневого цветов. Плотность – около  $2700 \text{ кг/м}^3$ , твердость по Моосу – 3, высокая хрупкость. Основной минералогический состав – кальцит (>90%), возможны примеси арагонита и доломита. Образуется в условиях осадочного и гидротермального происхождения. Используется в декоративной отделке, резьбе по камню, изготовлении сувениров.

Серпентинит Лабинского месторождения – метаморфическая порода зеленоватых оттенков с восковым блеском, сформированная в результате изменения ультраосновных пород. Плотность –  $2500 - 2700 \text{ кг/м}^3$ , твердость – 2,5-4. Минералогический состав включает серпентин, магнетит, хлорит.

Лабинское месторождение известно высококачественным серпентинитом с низким содержанием примесей [126].

Гипс Новомосковского месторождения – осадочная порода, состоящая из сульфата кальция, мягкая, легкорастворимая в воде, часто белого или сероватого цвета. Плотность – 2300 кг/м<sup>3</sup>, твердость – 2. Минералогический состав представлен гипсом (>95%) и ангидритом. Новомосковское месторождение дает высокочистый гипс, пригодный для производства строительных и медицинских материалов. Используется в строительстве, производстве гипсокартона и медицинского гипса [127].

Доломит Мелеховского месторождения – осадочная карбонатная порода, состоящая преимущественно из минерала доломита. Плотность – 2800 - 2900 кг/м<sup>3</sup>, твердость – 3,5-4. Минералогический состав – доломит (>90%), кальцит. Месторождение известно высокой прочностью и чистотой сырья. Применяется в строительстве, металлургии, производстве стекла.

Гранит Токовского месторождения – магматическая глубинная порода серо-розового цвета с крупнозернистой структурой. Плотность – 2600 – 2700 кг/м<sup>3</sup>, твердость – 6-7. Основные минералы – кварц, полевой шпат, слюда. Токовский гранит ценится за высокую прочность и декоративные свойства [128].

Долерит Хребтового месторождения – магматическая порода, относящаяся к габбро-группе, темного цвета, мелкозернистая. Плотность – 2900 - 3000 кг/м<sup>3</sup>, твердость – 5-6. Основные минералы – пироксен, плагиоклаз. Добывается в массивных блоках, пригоден для высокопрочных изделий. Применяется в дорожном строительстве, облицовке, ритуальных изделиях.

Железистый кварцит Курской магнитной аномалии – метаморфическая порода с высокой концентрацией железосодержащих минералов. Плотность – 3200 - 3500 кг/м<sup>3</sup>, высокая прочность. Минералогический состав – кварц, гематит, магнетит [129].

Гранит Мансуровского месторождения – магматическая порода серого цвета с равномернозернистой структурой. Плотность – 2600 - 2700 кг/м<sup>3</sup>,

твердость – 6-7. Основные минералы – кварц, полевой шпат, биотит. Отличается низким водопоглощением и высокой морозостойкостью [130].

Гранит месторождения Возрождение – магматическая порода с розоватым оттенком, прочная и декоративная порода. Плотность – 2600 - 2700 кг/м<sup>3</sup>, высокая прочность. Минералогический состав – кварц, полевой шпат, слюда [131]. Известен своим декоративным качеством и устойчивостью к выветриванию.

Обозначения групп образцов в коллекции следующие: оникс кальцитовый (группа «О»), серпентинит Лабинского месторождения (группа «С»), гипс Новомосковского месторождения (группа «Г»), доломит Мелеховского месторождения (группа «Д1»), гранит Токовского месторождения (группа «Гр1»), долерит Хребтового месторождения (группа «Дт»), железистый кварцит КМА (группа «ЖК»), гранит Мансуровского месторождения (группа «Гр2»), а также гранит месторождения Возрождение (группа «Гр3»).

Образцы подготавливались в виде правильных параллелепипедов размерами 40×40×80 мм (±1 мм). Для подготовки образцов использовались: станок для камня, оборудование для шлифования. Общий вид полученных образцов представлен на рисунке 2.1 [132].



Рисунок 2.1 – Образцы горных пород различных генотипов

С целью проведения дальнейших экспериментов по изучению шероховатости и оптических свойств горных пород на грани образцов была нанесена шероховатая поверхность с использованием абразива различной степени крупности. Пример одного из подготовленных таким образом образцов представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Пример подготовленного образца оникс кальцитового (группа «О»)

Оценка фактического значения шероховатости, выражаемой через параметр  $R_a$ , определялась по ГОСТ 25142-82 с использованием выражения

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2.1)$$

где  $y_i$  – абсолютные значения отклонений профиля от средней линии, мкм.

Для измерения значений  $y_i$  использовался специализированный стенд, состоящий из ровной металлической плиты и станины с закрепленным на нем датчиком перемещения часового типа с разрешением 0,001 мм. К подвижному плунжеру датчика был присоединена стальная игла, с помощью которой и производились измерения высоты образца. Схема использованного измерительного стенда приведена на рисунке 2.3.

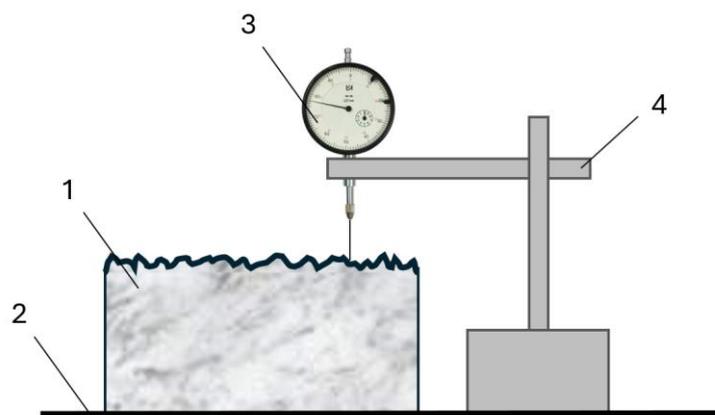


Рисунок 2.3 – Схема лабораторного стенда для измерения шероховатости поверхности образца породы: 1 – образец; 2 – стальная плита; 3 – датчик перемещения часового типа; 4 - станина

Для каждой грани каждого из образцов производилось не менее 20 измерений, которые усреднялись с использованием выражения (2.1). Осредненные по группам образцов результаты прямого измерения значений  $R_a$  сведены в таблицу 2.1

Таблица 2.1 - Осредненные по группам образцов результаты прямого измерения значений шероховатости  $R_a$ , мкм

Номер грани призматического образца Группа образцов	1	2	3	4
О	10	53	106	191
С	11	48	103	206
Г	9	49	100	209
Д1	9	51	98	215
Гр1	10	47	98	198
Дт	11	52	98	202
ЖК	10	52	104	215
Гр2	10	52	99	189
Гр3	11	48	105	191
Среднее значение $R_a$	10,1	50,2	101,2	201,8

Из таблицы 2.1 видно, что типичными значениями шероховатости для

граней 1-4 являются 10, 50, 100 и 200 мкм соответственно. В дальнейшем именно эти округленные значения и будут приниматься за значения шероховатости для четырех граней образцов.

Более детальное изучение структуры исследованных пород было произведено на основе анализа микрофотографий поверхности образцов, полученных с помощью портативного ЖК-цифрового микроскопа с 200-кратным увеличением и 5.0 MPixel камерой. Характеристики микроскопа приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики портативного микроскопа

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
Датчик изображения	5 MPixel (до 12 MPixel с интерполяцией)
Увеличение	20x-200x крат
Разрешение фото (оптическое)	2592x1944 VGA
Разрешение видео (оптическое)	640x480 AVI
Объектив	Линза высокого качества
Дисплей	7,62 см (3") цветной ЖК-монитор
Источники света	8 белых светодиодов с регулировкой яркости
Источник питания	Li-ion 3.7V / 800mAh аккумулятор Время работы: 4 часа; Время зарядки: 5 часов
Частота кадров	30 кадров в секунду
Фокусное расстояние	от 10 до 300 мм
Размеры	130x103x29 мм

В результате были получены изображения с 50-кратным и 200-кратным увеличением, приведенные на рисунке 1.4

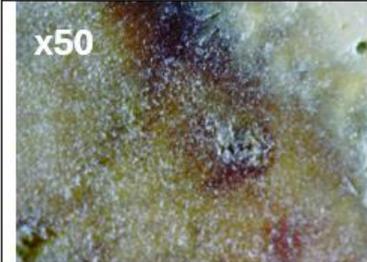
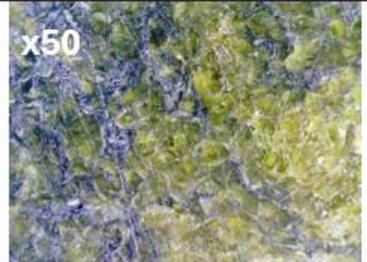
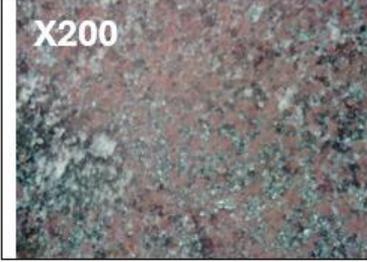
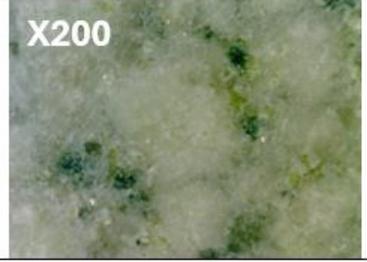
Оникс кальцитовый(группа «О»)	Серпентинит (группа «С»)	Гипс (группа «Г»)
 x50	 x50	 x50
 X200	 X200	 X200
Доломит (группа «Д1»)	Гранит (группа «Гр1»)	Долерит (группа «Дт»)
 x50	 x50	 x50
 X200	 X200	 X200
железистый кварцит КМА (группа «ЖК»)	Гранит (группа «Гр2»)	Гранит (группа «Гр3»)
 x50	 x50	 x50
 X200	 X200	 X200

Рисунок 2.4 – Микрофотографии образцов

Наибольшая степень анизотропии наблюдается в образцах железистого кварцита группы ЖК. Осадочные породы, такие как гипс и доломит, характеризуются однородностью структуры, а также равномерно распределенными порами, размер которых колеблется в районе  $1000 \text{ мкм}^2$  [133].

## **2.2 Изучение параметров трещин в горных породах на основе дискретных оптических измерений**

Анализ оптических методов изучения трещиноватости горных пород, приведенный в п. 1.2.2.1, свидетельствует о том, что основным принципом выявления трещин является анализ растрового изображения. При этом ось камеры, как правило, находится под прямым углом к поверхности породы, а освещение обеспечивается большим количеством равномерно распределенных светодиодов, обеспечивающих практически полное отсутствие тени. При этом сам факт наличия трещины устанавливается на основе анализа большого количества отдельных пикселей, относящихся к самой трещине, ее берегам и вмещающей ее породе. Таким образом для решения задачи выявления трещины используется большое количество информации, включающей яркость и цвет отдельных пикселей. Подобный объем информации не может быть представлен в виде каротажной кривой и не может быть напрямую математически комплексирован с результатами других каротажных измерений.

Еще одним способом определения наличия трещины, выходящей на поверхность горной породы, является анализ интенсивности  $I$  отраженного света, направленного под острым углом к поверхности. Общая схема подобных измерений представлена на рисунке 1.5.

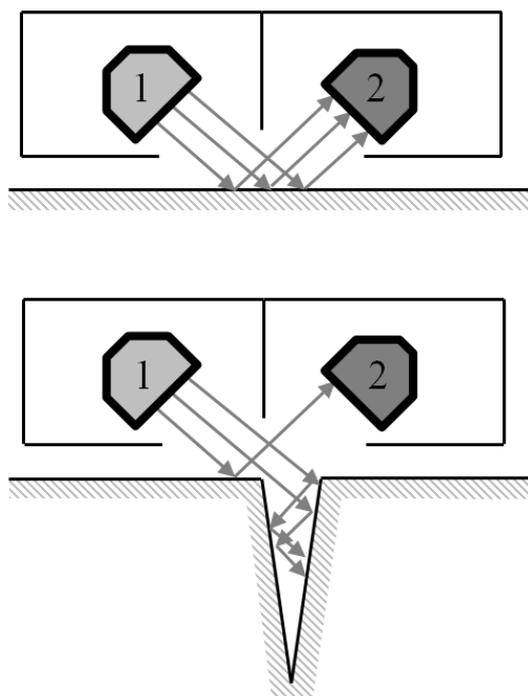


Рисунок 2.5 – Схема дискретного оптического выявления трещин: 1 – излучающий светодиод; 2 – фоточувствительный элемент

Из схемы на рисунке 2.5 видно, что наличие трещины снижает интенсивность регистрируемого фоточувствительным элементом света. Оборудования для реализации победных измерений в скважинных условиях на данный момент не существует, поэтому для проведения экспериментальных исследований потребовалось разработать и изготовить специализированные электронные модули. Изготовление модулей было разделено на два этапа – изготовление одноканального датчика для измерений на плоской поверхности образцов, и изготовления многоканального модуля для проведения измерений в скважинах.

Одноканальный модуль представлял собой электронное устройство, подключаемое к персональному компьютеру. В качестве источника света использовался светодиод GNL-5053UWC видимого света (от 5500 до 7000 К). В роли фоточувствительного элемента выступал фоторезистор PGM5516, подключенный в качестве делителя напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит. Угол между осью светодиода и поверхностью сканирования составлял  $45^\circ$ . На рисунке 2.6 представлена электронная схема

модуля, на рисунке 2.7 – общая схема измерительного комплекса.

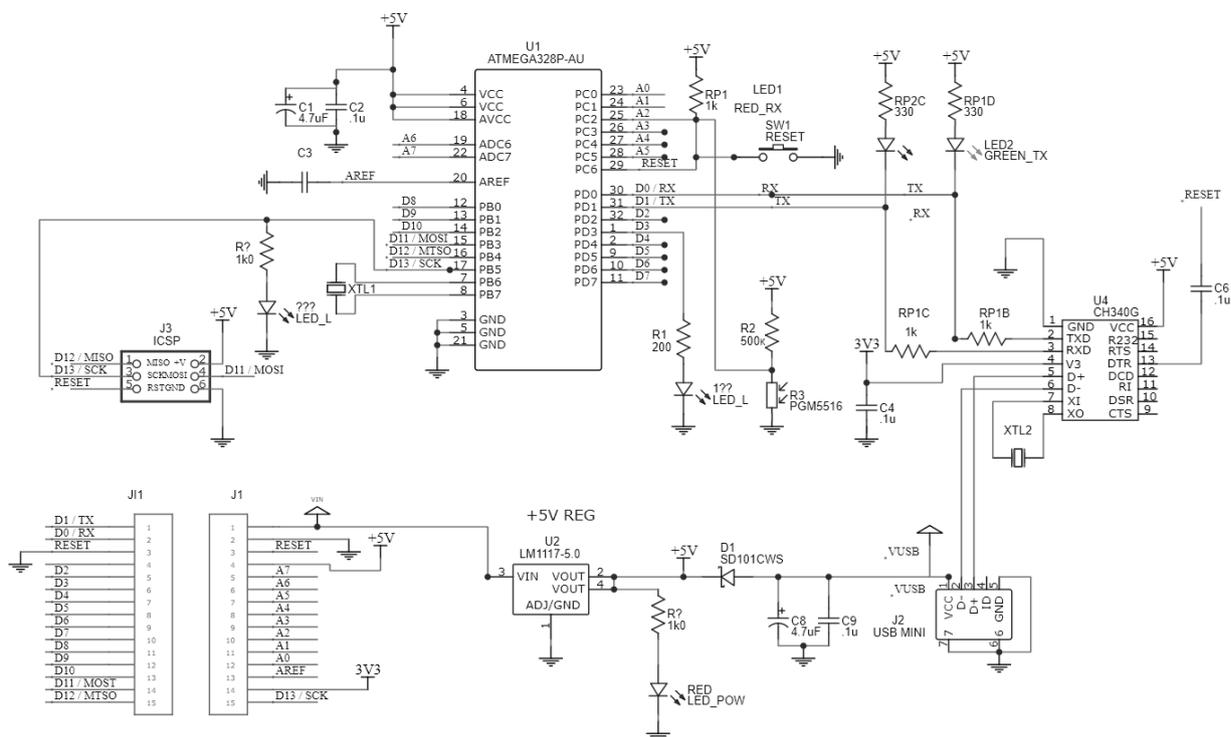


Рисунок 2.6 – Электрическая схема оптического модуля выявления трещин

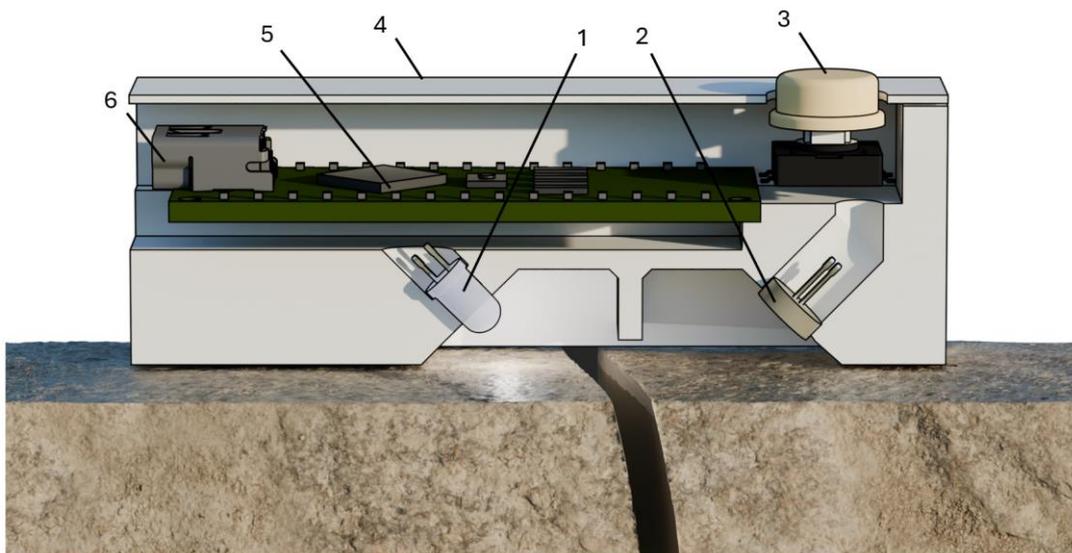


Рисунок 2.7 – Устройство оптического модуля определения цвета породы: 1 – светодиод, 2 – фоторезистор, 3 – кнопка регистрации, 4 – корпус, 5 – плата АЦП и регистрации, 6 – разъем подключения к компьютеру

Результатом работы модуля является выводимый на экран

персонального компьютера дискретный график значений интенсивности  $I$  в функции от координаты. Съемка производится в ручном режиме при нажатии оператором на кнопку, расположенную на верхней части модуля. Перемещение зонда вдоль профиля фиксируется с помощью линейки.

### **2.2.1 Оценка помехового влияния цвета и степени шероховатости горной породы на результаты оптического выявления трещин**

Как уже отмечалось ранее, экспериментальные исследования, производимые по схеме, представленной на рисунке 2.5, предполагают измерение интенсивности отраженного света. Очевидно, что цвет, а также шероховатость поверхности будут изменять ее отражающие способности, что можно воспринимать как действие помеховых факторов. Поэтому первым этапом лабораторных исследований стала оценка влияния цвета и шероховатости на результаты выявления единичных трещин. Измерения производились одноканальным модулем на всех гранях подготовленных ранее призматических образцов пород. Для каждого образца и типа поверхности были определены значения интенсивности отраженного света  $I$  на основе статистического анализа 30 измерений на каждой грани. Результаты сканирования приведены на рисунке 2.8. Также для сравнения на рисунке 2.8 приведено значение  $I$  для случая прохождения фоточувствительного датчика над трещиной с раскрытием 1 мм (образец группы «С»).

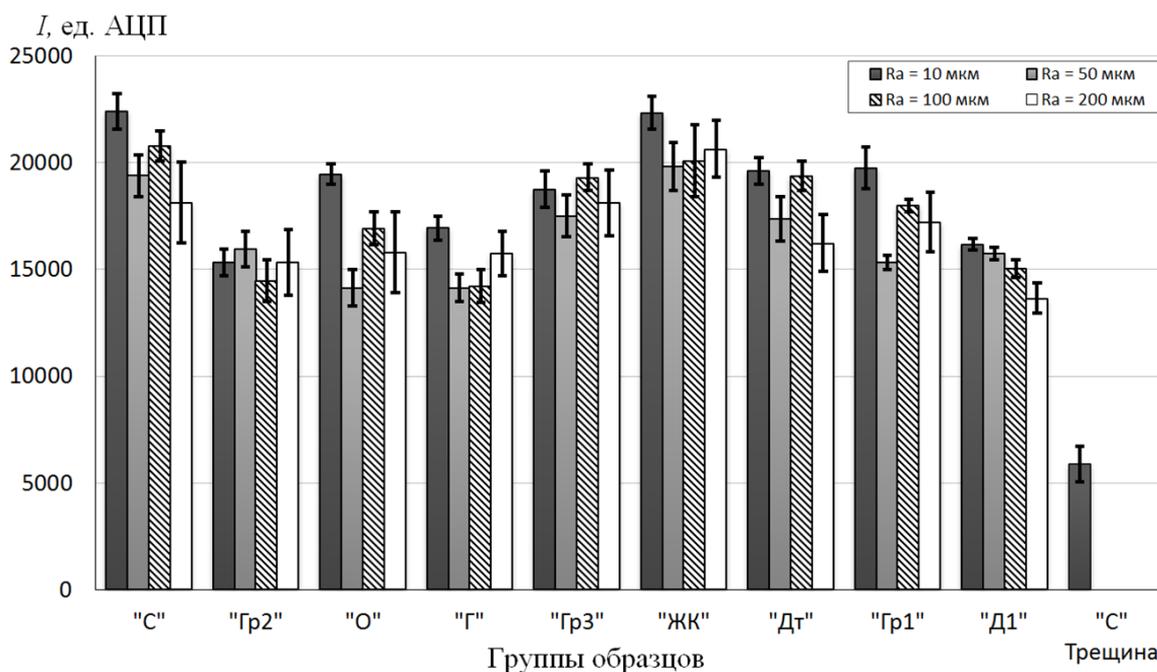


Рисунок 2.7 - Результаты экспериментального определения  $I$  на различных образцах горных пород при различных уровнях шероховатости (планками указано среднеквадратическое отклонение)

Из диаграммы на рисунке 2.7 видно, что наименьшие значения  $I$  соответствует поверхностям образцов с наибольшей шероховатостью, что, очевидно, связано с высокой степенью рассеяния света на неровностях. Минеральный состав, определяющий цвет ее поверхности, также оказывает влияние на значения  $I$ , которое изменяется в пределах 30 % от максимального значения  $I$  в выборке. При этом прохождение фоточувствительного элемента над трещиной приводит к значительно большему изменению значений  $I$  (падение составляет более 70 %). Таким образом, цвет и шероховатость поверхности скважины можно считать помеховыми факторами, однако их влияние на значения интенсивности отраженного света оказывается незначительным на фоне изменений  $I$  при обнаружении трещины.

## 2.2.2 Контроль трещиноватости приконтурного массива пород на основе оптических измерений в скважинах

Для проверки работоспособности предлагаемого метода была изготовлена модель скважины из песчано-цементной смеси диаметром

$d_{ск} = 76$  мм и шероховатостью внутренней поверхности  $R_a = 200$  мкм. В скважине была оборудована щель с углом падения  $30^\circ$  с изменяемой шириной раскрытия, имитирующая трещину. Контроль величины раскрытия производился с помощью стандартного набора щупов. После выставления необходимого зазора между частями модели ее части фиксировались с помощью стопорных винтов.

Оптическое сканирование стенок скважины производилось с помощью изготовленного 8-канального зонда, подключаемого к персональному компьютеру [134]. Основной принцип проведения измерений описан в п.2.2.1 и был успешно опробован при использовании одноканального модуля. В варианте для проведения скважинных измерений 8 фоточувствительных элементов располагались равномерно по окружности с шагом  $45^\circ$ . Также скважинный вариант оснащен центрирующими роликами для поддержания фиксированного зазора между зондом и стенкой скважины. На рисунке 2.8 представлена конструкция скважинного зонда, на 2.9 – общий вид лабораторного стенда.

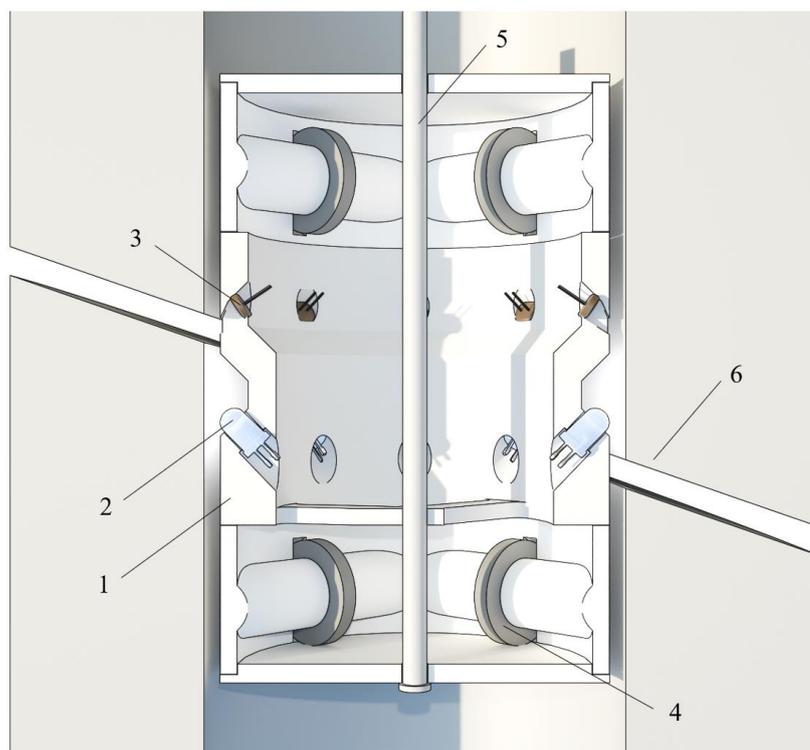


Рисунок 2.8 – Схема скважинного 8-канального оптического модуля изучения трещиноватости: 1 – корпус модуля; 2 – светодиод; 3 – фоторезистор; 4 – центрирующий ролик; 5 – центральный армирующий стержень; 6 – модель скважины с трещиной

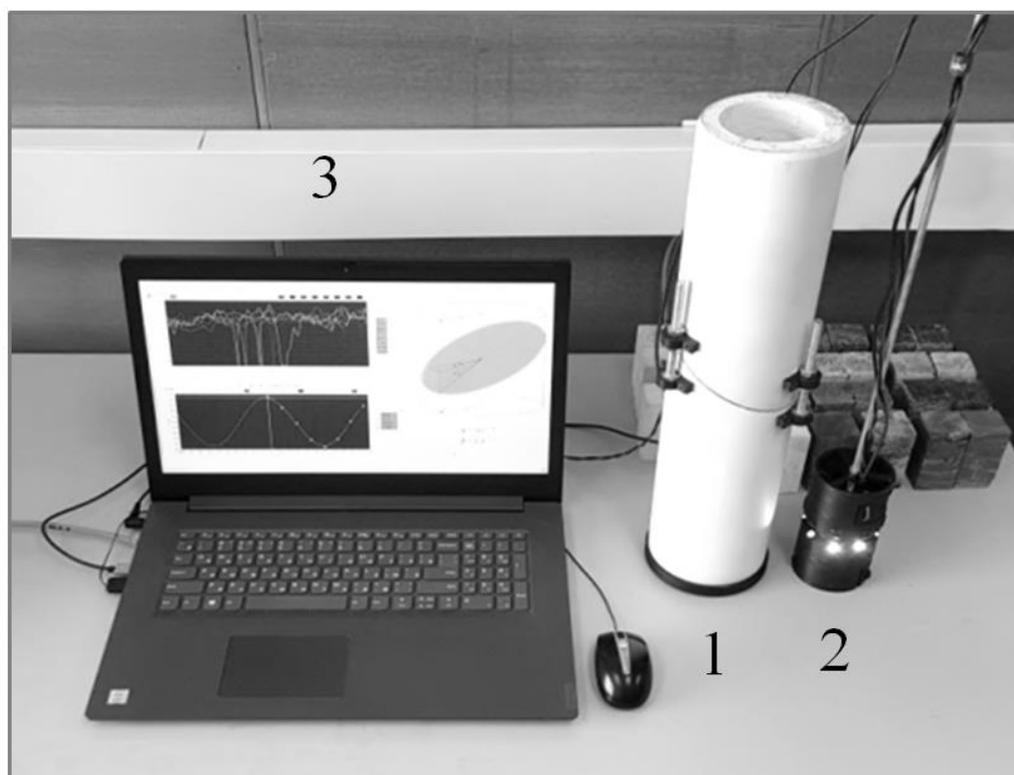


Рисунок 2.9 – Общая схема лабораторного стенда: 1– модель скважины; 2 – оптический зонд, 3 – ПК

Сканирование производилось вдоль вертикальной оси  $z$  с шагом 1 мм.

На рисунке 2.10 представлен пример результатов сканирования скважины для трещины с раскрытием 1 мм в виде нормированных зависимостей  $I(z)$ .

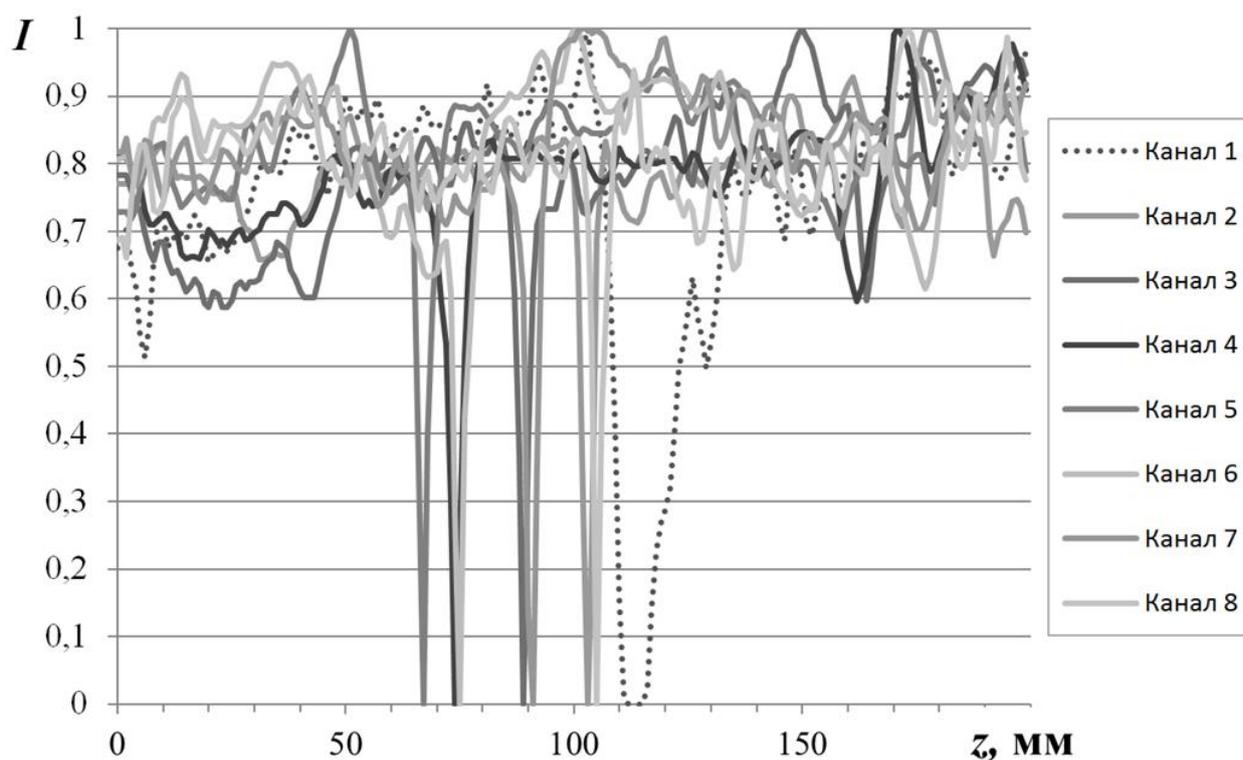


Рисунок 2.10 – Пример результата оптического сканирования скважины многоканальным модулем

Из рисунка 2.10 видно, что для каждого из 8 каналов характерен локальными минимум, означающий нахождение пары светодиод – фоторезистор прямо напротив трещины. Несовпадение минимальных значений обусловлено наклоном трещины.

В задачу исследования входило определение ориентации трещины при разных величинах ее раскрытия. Ориентация трещин определяется двумя углами: углом падения (наклона)  $\alpha$  и азимутом простираения  $\beta$  и иллюстрируется рисунком 2.11а.

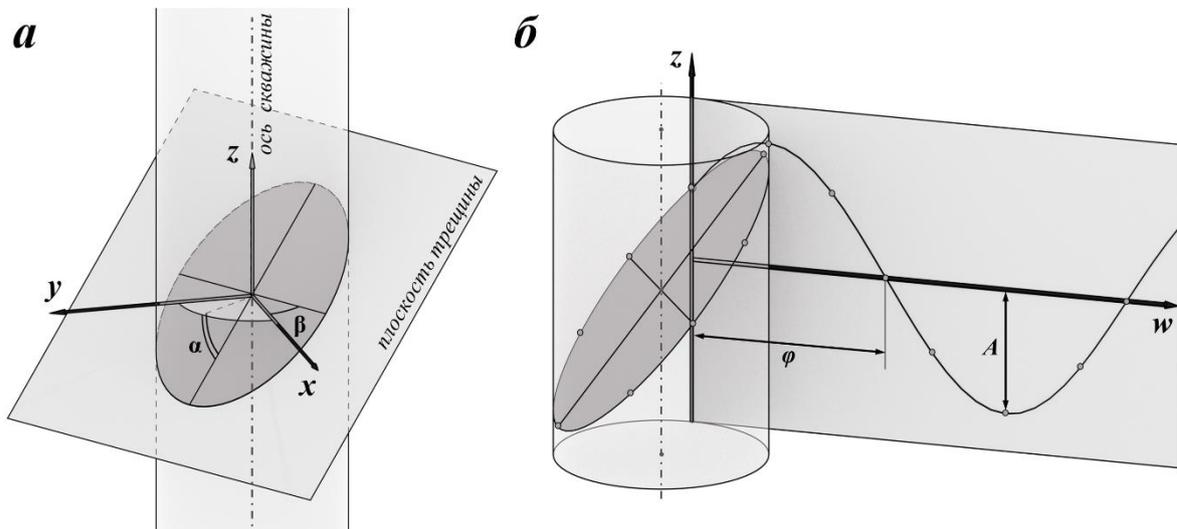


Рисунок 2.11 – Схема ориентации трещины, пересекающей измерительную скважину, (а) и развертка участка скважины (б)

На рисунке 2.11б представлена развертка участка скважины, пересеченной трещиной. При этом на плоскости  $zw$  трещина представляется в виде гармонической функции, амплитуда  $A$  которой обусловлена углом падения  $\alpha$ , а фаза  $\varphi$  – азимутом простирания  $\beta$ .

Первым этапом обработки являлось нахождение координат минимальных значений  $I_i^{\min}$ , соответствующих прохождению  $i$ -ого фоточувствительного элемента над трещиной. Исходя из известного расстояния между датчиками, а также диаметра скважины, указанные точки наносились на развертку скважины, как это показано на рисунке 2.11а. Задача определения углов  $\alpha$  и  $\beta$  в этом случае сводится к аппроксимации указанных точек функцией

$$z = a_0 + a_1 \cos(a_2 x + a_3), \quad (2.2)$$

и последующим нахождением  $\alpha$  и  $\beta$  из

$$\alpha = \frac{180 \cdot \arctg \frac{2a_1}{d_{ск}}}{\pi}, \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{a_3 \cdot 180}{\pi} - 90, \quad (2.4)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  и  $a_3$  – коэффициенты регрессии (в данном случае  $a_1 = A, a_3 = \varphi$ ).

Однако из рисунка 2.10 видно, что для первого канала изменение  $I$  вблизи минимума не носит резкий характер, пик оказывается растянутым вдоль оси скважины. Это обусловлено наличием сколов на границе трещины (характерных и для реальных трещин в массиве). Очевидно, что результаты измерений в таких областях будут в значительной степени искажены и должны вносить меньший вклад в процесс аппроксимации, чем точки с ярко выраженными пиками вблизи  $I_i^{\min}$ . Для реализации подобного подхода аппроксимация производилась методом взвешенных наименьших квадратов (ВМНК), основной смысл которого можно продемонстрировать выражением

$$\sum_{i=1}^n W_i (z_i - z_i^*)^2 = \min, \quad (2.5)$$

где  $z_i$  и  $z_i^*$  измеренная и предсказанная аппроксимацией  $z$  координата точки  $i$ -ым фоточувствительным элементом,  $W_i$  – матрица весовых коэффициентов. Нахождение минимальной суммы квадратов остатков производилось по алгоритму Левенберга-Марквардта [135], наиболее эффективному при малом количестве измерений.

На сегодняшний день существует множество подходов к формированию весов для экспериментальных точек. Одним из распространенных подходов является использование величин, обратно пропорциональных дисперсии значений в окрестности точки. Однако в данной работе предлагается использовать прямое назначение весов (т.н. direct weighting). В этом случае значения  $W_i$  получают путем анализа ширины пика графиков  $I_i(z)$  из

$$W_i = \frac{1}{\Delta I_i}, \quad (2.6)$$

где  $\Delta I_i$  – количество соседних точек нормированной зависимости  $I_i(z)$ ,

имеющих значение 0.

Таким образом, увеличение ширины пика  $I_i(z)$  снижает вес  $W_i$ , что повышает точность аппроксимации и, как следствие, точность определения углов  $\alpha$  и  $\beta$ . Это особенно актуально при малом раскрытии трещин. Результат аппроксимации точек методом ВМНК представлен на рисунке 2.12.

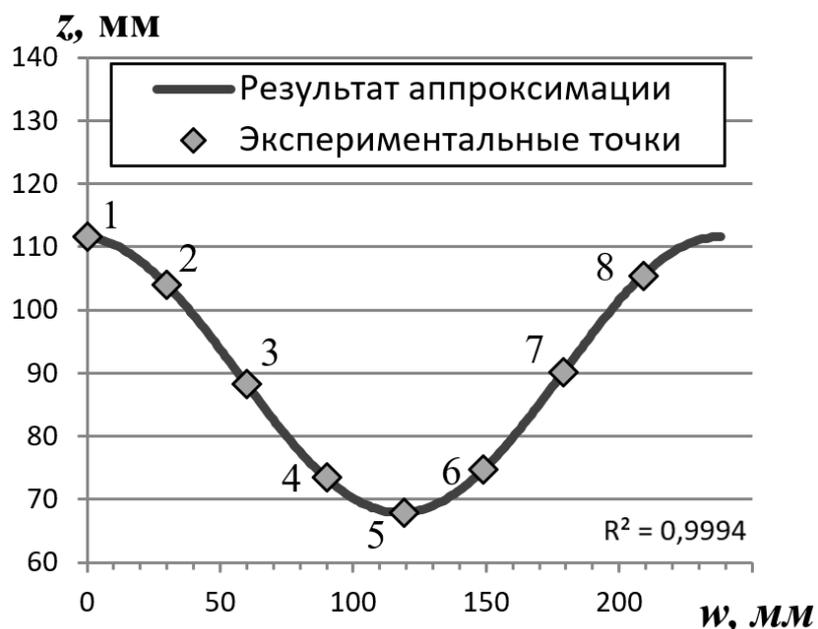


Рисунок 2.12- Результат аппроксимации значений с использованием ВМНК (развертка скважины)

На рисунке 2.13 представлены результаты определения относительных погрешностей оценок углов падения и простирания трещины  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  при использовании для аппроксимации стандартным методом наименьших квадратов (МНК) и предложенного в настоящей работе взвешенного метода наименьших квадратов. Также на рисунке 2.13 представлено вычисленное на основе анализа зависимостей  $I(z)$  соотношение сигнал/шум, которое косвенно может указывать на эффективность применения оптического метода для поиска трещин с различным раскрытием.

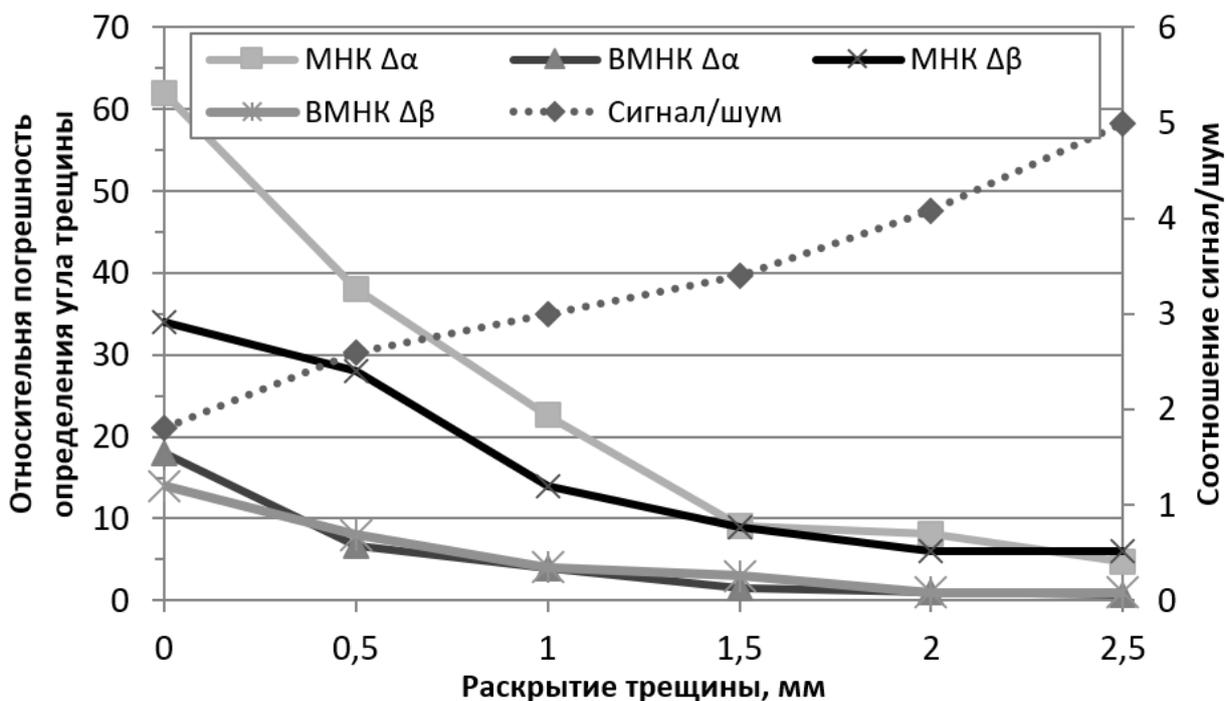


Рисунок 2.13 – Относительные погрешности определения углов  $\alpha$  и  $\beta$  (б) в зависимости от величины раскрытия трещины

Из рисунка 2.13 видно, что применение предложенного ВМНК существенно увеличивает точность определения углов  $\alpha$  и  $\beta$ . Также очевидно, что для сомкнутых трещин эффективность метода снижается на фоне низкого соотношения «сигнал/шум». Уже при раскрытии трещины 0,5 мм погрешности определения углов падения и простирания составляют менее 8 %, а при раскрытии 1 мм – менее 5 %.

Таким образом показано, что шероховатость и цвет поверхности скважины могут выступать помеховыми факторами при реализации сканирования, однако не оказывают существенного влияния на его результаты. Наибольшую точность описанный подход демонстрирует при использовании взвешенного метода наименьших квадратов при аппроксимации показаний восьми фоточувствительных датчиков каротажного зонда. Основными достоинствами предлагаемого метода и оборудования являются возможность быстрого и непрерывного бесконтактного сканирования стенок скважины, а также вывод результатов сканирования сразу по завершении сканирования. Также к достоинствам метода можно

отнести получение измерительной информации в виде каротажных кривых, готовых к совместной обработке с результатами измерений другими каротажными методами, например ультразвуковыми.

### **2.3 Оценка шероховатости поверхности горной породы оптическими методами**

Анализ опыта применения акустического каротажа, проведенный в первой главе настоящей работы, однозначно указывает на то, что одним из существенных ограничений использования акустического каротажа для исследования структуры приконтурного массива является невозможность применения амплитудных информативных параметров (более чувствительных к трещинам) из-за чрезвычайной сложности обеспечения постоянства контактных условий «преобразователь-порода» в условиях «сухого» контакта. Одним из способов преодоления подобного ограничения может являться априорная оценка шероховатости оптическими методами и ее учет при интерпретации результатов УЗ каротажа, для чего также может быть применен принцип измерения свойств стенки скважины с использованием дискретных оптических датчиков. В частности, такое измерение может быть основано на измерении интенсивности  $I_p$  рассеянного на неровностях света с помощью фоточувствительных элементов. Принцип действия метода поясняется схемой, приведенной на рисунке 2.14.

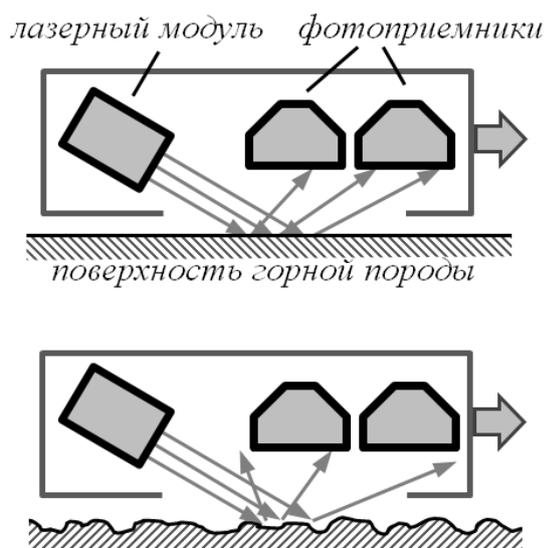


Рисунок 2.14 – Схема оптического измерения уровня шероховатости поверхности

Суть оптического метода оценки шероховатости состоит в облучении исследуемой поверхности когерентным лазерным излучением под острым углом и регистрации отраженного от неоднородностей света фоточувствительными элементами. Увеличение шероховатости приводит к увеличению рассеяния света и, как следствие, снижению величины  $I_p$ .

Для реализации измерений по схеме, представленной на рисунке 2.14, также потребовалось разработать и изготовить компактный электронный модуль, подключаемый к персональному компьютеру. В качестве источника света использовался лазерный модуль DSP6505-0415 с длиной волны  $\lambda = 650$  нм. В качестве фоточувствительного элемента выступали два фоторезистора PGM5516, подключаемые в качестве составной части делителя напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит. Предварительные тесты показали, что наибольшая чувствительность метода достигается при углах падения лазерного луча к поверхности сканирования  $10 \div 15^\circ$ . На рисунке 2.15 представлена электронная схема модуля, на рисунке 2.16 – общая схема измерительного комплекса.

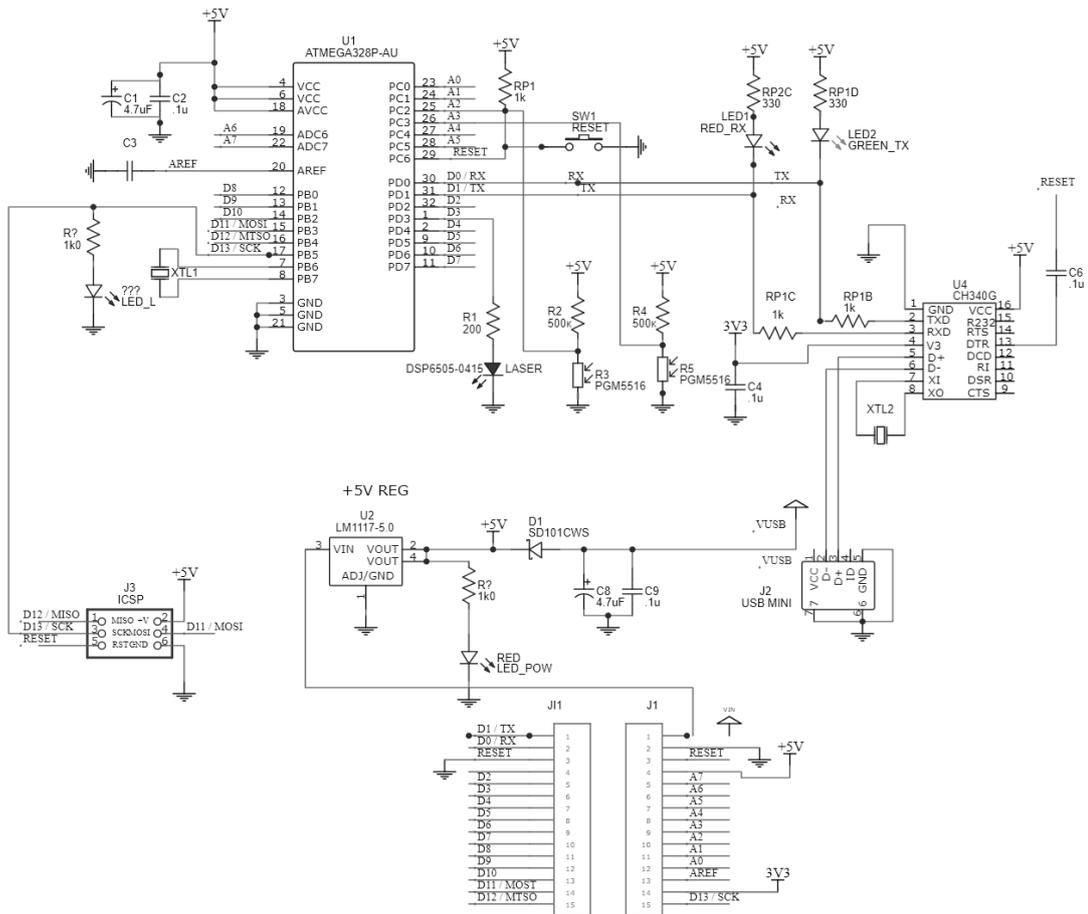


Рисунок 2.15 – Электрическая схема оптического модуля оценки шероховатости поверхности породы

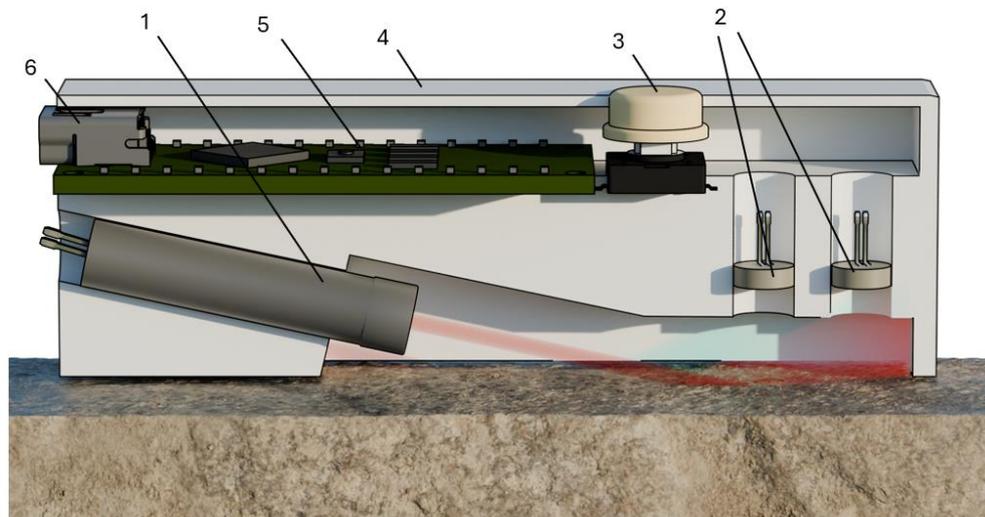


Рисунок 2.16 – Устройство оптического модуля определения шероховатости породы: 1 – источник лазерного излучения, 2 – фоторезисторы, 3 – кнопка регистрации, 4 – корпус, 5 – плата АЦП и регистрации, 6 – разъем подключения к компьютеру

Измерения производились на всех гранях образцов горных пород, описанных в п.2.1. Регистрация интенсивности отраженного света производилась вручную по нажатию аналоговой кнопки («КЕУ 1» на рисунке 2.15). Передача данных на персональный компьютер осуществлялась по интерфейсу UART посредством USB кабеля. Питание модуля напряжением 5 В осуществлялось по тому же проводу. Сканирование поверхности образцов производилось по точкам вдоль профиля с шагом 1 мм по схеме, представленной на рисунке 2.17. Значения  $I_p$  сохранялись на жесткий диск персонального компьютера отдельно для каналов №1 и №2. Для каждого образца и типа поверхности было проведено не менее 20 измерений.

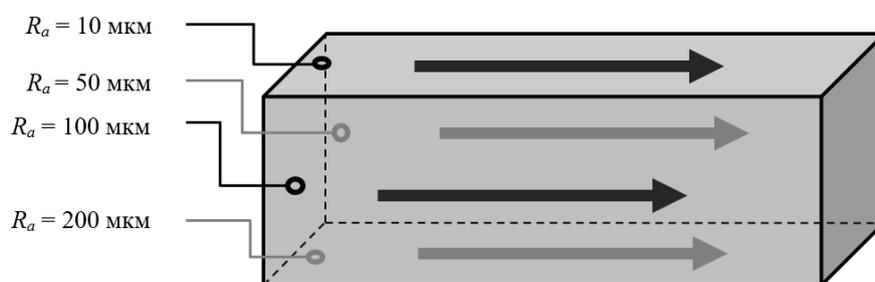


Рисунок 2.17 – Схема расположения профилей оптического сканирования

На рисунке 2.18 приведен пример определения интенсивности рассеянного света для образца Гр2 для всех уровней шероховатости поверхности. Аналогичные измерения были проведены для всех остальных образцов коллекции, описанной в п. 2.1.

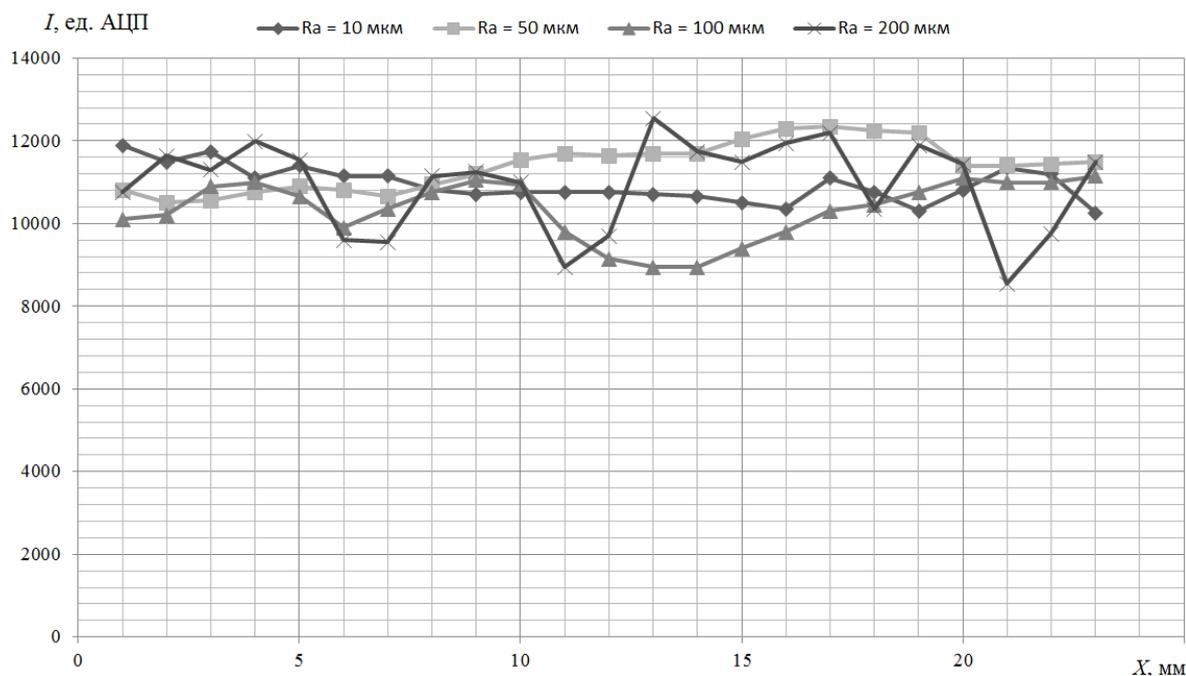


Рисунок 2.19 – Результаты определения значений  $I$  на образце серии «Гр2»

Для всех образцов вычислялось среднее значение интенсивности  $I_{cp}$  отраженного света и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  исходя из выражений

$$I_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (2.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{cp})^2}, \quad (2.8)$$

где  $n$  – количество элементов в выборке.

Результаты расчета  $I_{cp}$  для различных типов пород и уровней шероховатости поверхности представлены на рисунке 2.20.

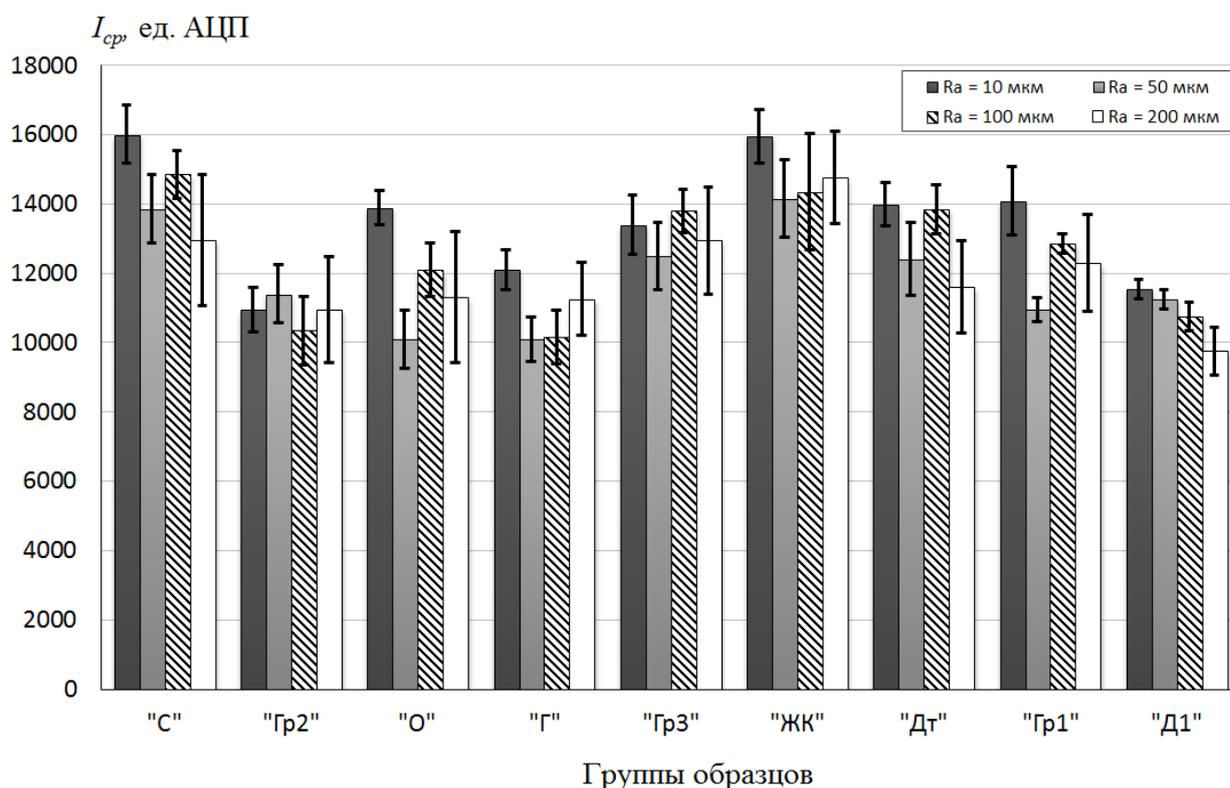


Рисунок 2.20 – Результаты расчета средних значений интенсивности  $I_{cp}$  (планками показано среднеквадратическое отклонение)

На основании рассчитанных значений  $I_{cp}$  вычислялся коэффициент отражения из выражения

$$\rho = \frac{I_{cp}}{I_{пад}}, \quad (2.9)$$

где  $I_{пад}$  – оценка интенсивности падающего излучения, зарегистрированная модулем, размещенным на зеркальной поверхности.

Результаты расчета значений  $\rho$  для различных типов пород и уровней шероховатости поверхности представлены на рисунке 2.21.

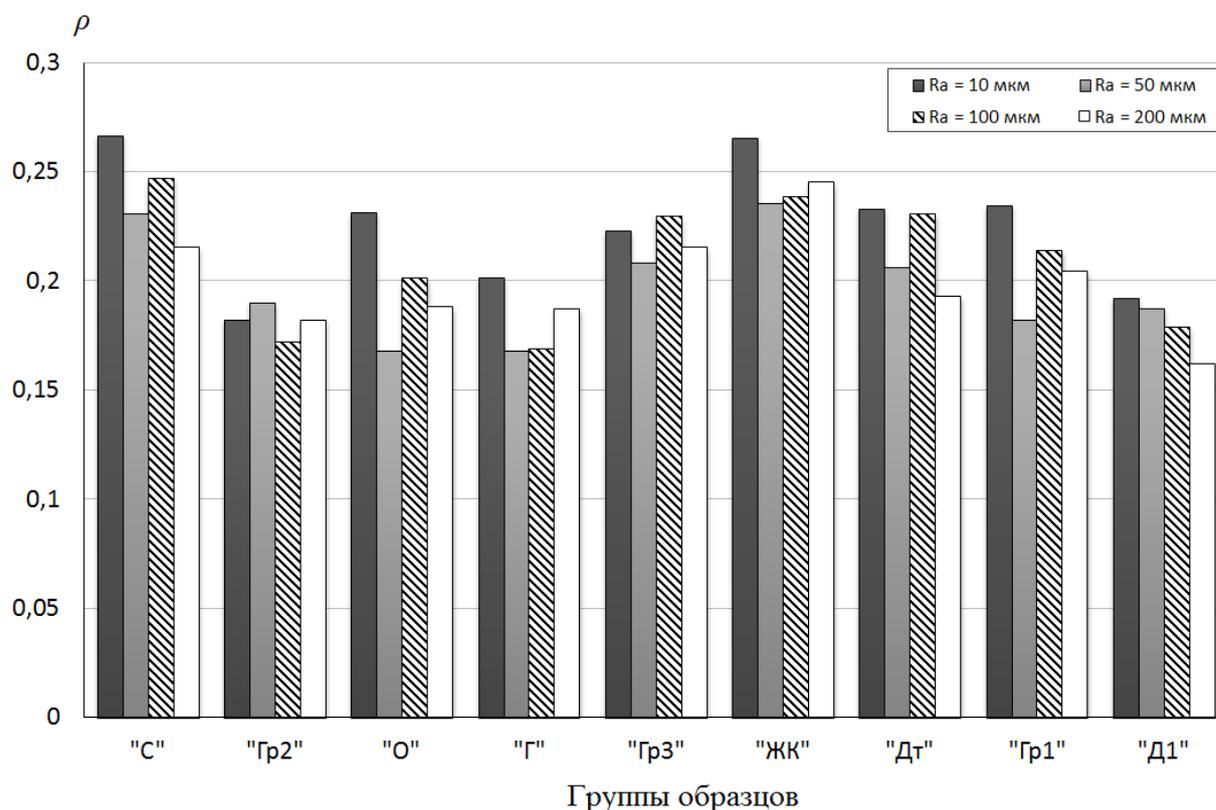


Рисунок 2.21 – Результаты расчета значений коэффициента отражения  $\rho$

Из рисунка 2.21 видно, что большим значениям  $R_a$ , как правило, соответствуют более низкие значения коэффициента отражения. Однако подобное соотношение проявляется не для всех пород и часто носит нелинейный характер. Из-за этого пользоваться указанным параметром для оценки степени шероховатости с точки зрения обеспечения высокой надежности измерений не представляется возможным. Очевидно, что осреднение информации, полученной в нескольких последовательных точках измерений, приводит к потере части важной информации об особенностях поверхности образцов горных пород. Более детальный анализ можно реализовать, сравнив кривые  $I_p(x)$ , пример которых для образца Д1 приведен на рисунке 2.22.

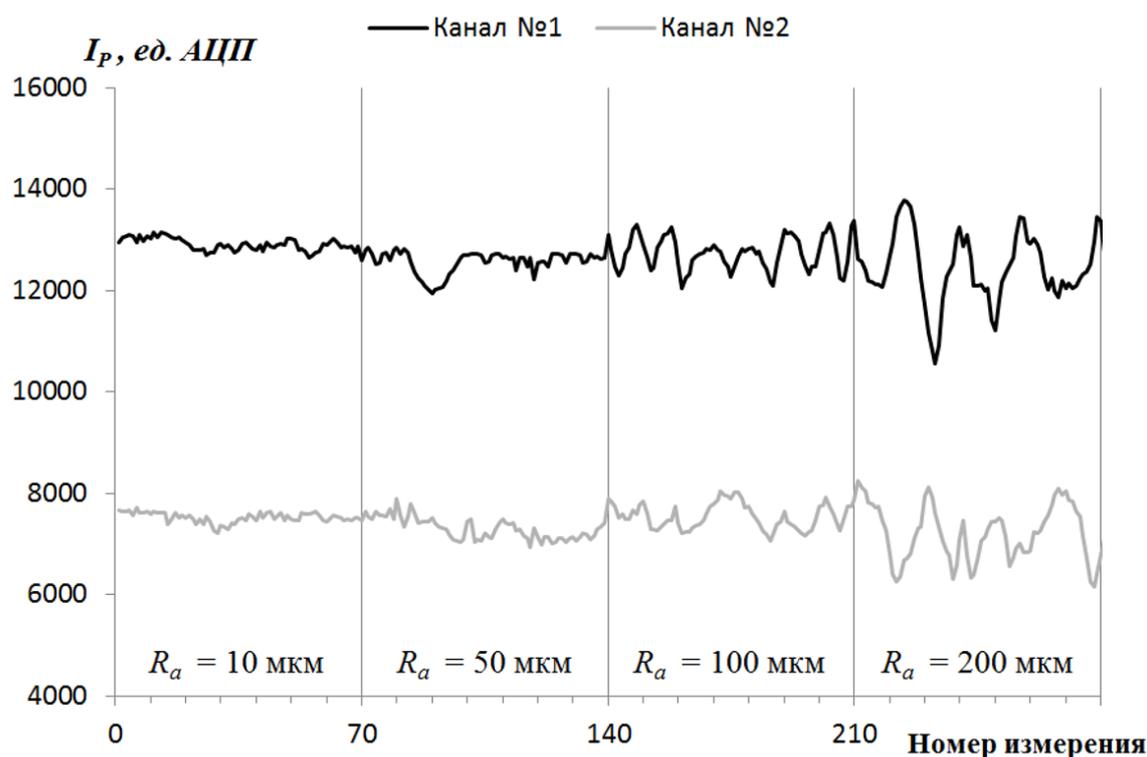


Рисунок 2.22 – Результаты оптического сканирования на примере образца группы «Д1»

Из рисунка 2.22 видно, что амплитуда колебаний  $I_p$  увеличивается с ростом  $R_a$ . Для оценки амплитуды колебаний использовался коэффициент вариации, рассчитываемый для выборки значений, соответствующих одному уровню шероховатости

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}, \tag{2.10}$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение,  $\mu$  – математическое ожидание.

Кроме оценки изменения амплитуды колебаний интерес также представляет анализ совместного изменения  $I_p$ , зарегистрированных 1 и 2 каналами. Оценка степени такого изменения производилась на основе коэффициента корреляции сигналов  $R_{\text{сиг}}$  [136]

$$R_{\text{сиг}} = \frac{B_{xy}(0)}{\sqrt{B_{xx}(0) \cdot B_{yy}(0)}}, \tag{2.11}$$

где  $B_{xy}(0)$  – значение взаимной корреляционной функции сигналов с 1 и 2 каналов при величине временного лага  $\tau = 0$ ;  $B_{xx}(0)$ ,  $B_{yy}(0)$  – значения автокорреляционных функций с 1 и 2 канала соответственно при  $\tau = 0$ .

Для компенсации расстояния между фотоприемниками при вычислении значений коэффициента отражения  $\rho$  вводилась задержка сигнала первого канала относительно второго, при шаге сканирования 1 мм равная 5 отсчетам (расстояния между фоторезисторами равны 5 мм). Вычисленные значения  $C_V$  и  $R_{\text{сиг}}$  представлены на рисунке 2.23.

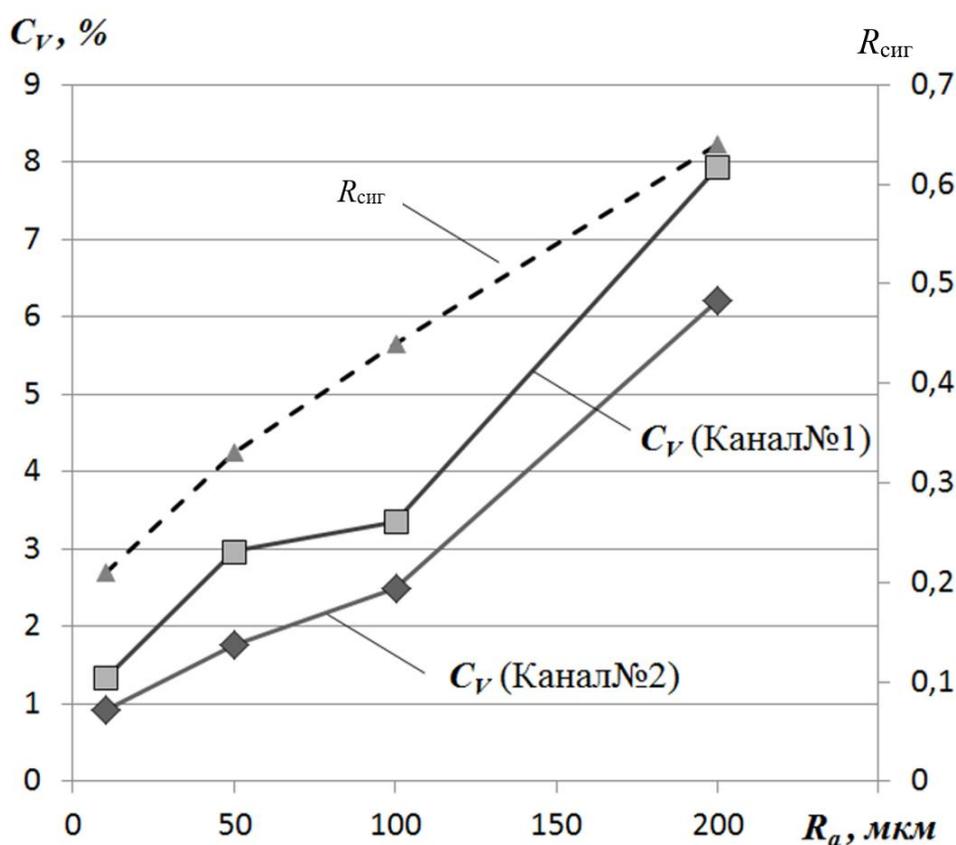


Рисунок 2.23 - Вычисленные значения  $C_V$  и  $R_{\text{сиг}}$  для образца группы Д1

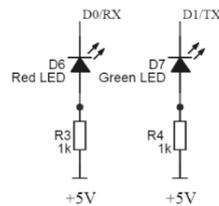
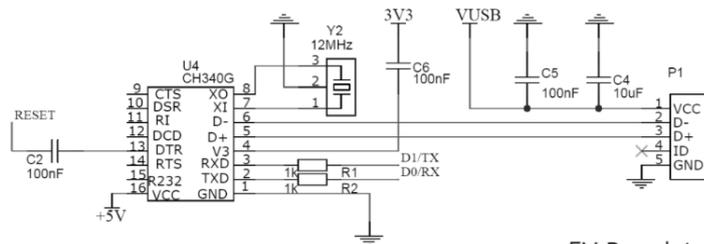
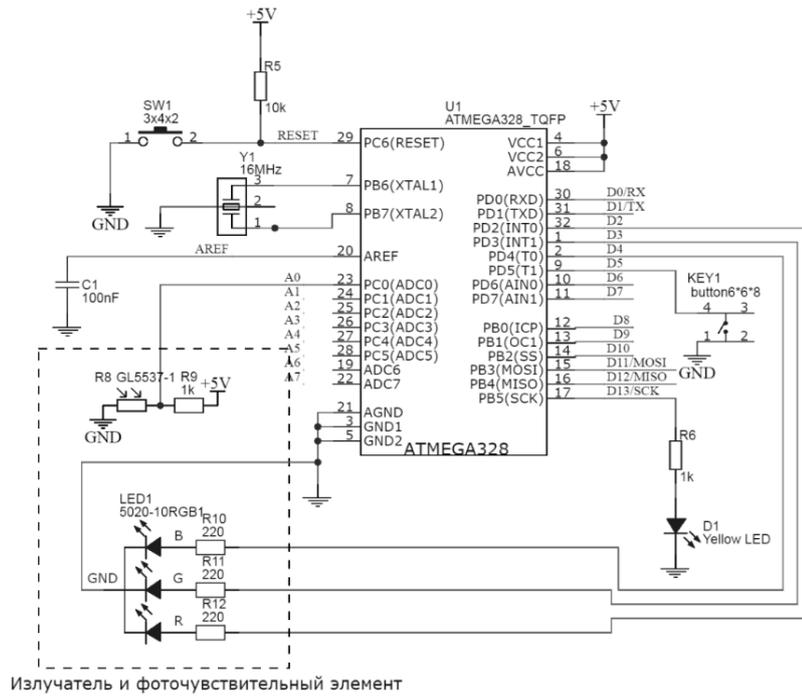
Из рисунка 2.23 видно, что с увеличением степени шероховатости наблюдается практически линейный рост  $C_V$  на обоих каналах. Кроме того, значения  $R_{\text{сиг}}$  также демонстрируют линейное возрастание. Это связано с тем, что при малых значениях  $R_a$  изменения  $I_P$  носят хаотичный характер, что предопределяет низкие значения  $R_{\text{сиг}}$ . С ростом  $R_a$  отдельные неровности

проявляются более отчетливо, заставляя  $I_p$  изменяться волнообразно. При этом наблюдается рост корреляции сигналов, снятых вдоль одного профиля – попеременно низкие и высокие значения  $I_p$  начинают совпадать для разных каналов. Зависимости, приведенные на рисунке 2.23, характерны и для других пород, участвовавших в исследовании.

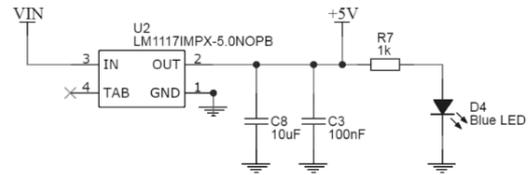
Предлагаемый подход к количественной оценке уровня шероховатости горной породы может лечь в основу обеспечения возможности использования динамических информативных параметров ультразвукового каротажа. Подробно этот вопрос будет рассмотрен в 3 главе настоящей работы.

## **2.4 Оптическое определение типа горной породы**

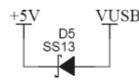
Описанный ранее электронный модуль, снабженный вместо источника лазерного излучения универсальным *RGB* светодиодом, может быть использован для определения цвета поверхности измерительной скважины. Указанная информация может существенно повысить надежность литологического расчленения массива в зоне контроля с применением других каротажных методов (например, ультразвукового). Для реализации описанного подхода экспериментально определялась интенсивность света  $I_o$ , отраженного от поверхности, последовательно освещаемой различными цветами: красным ( $\lambda = 625-740$  нм), зеленым ( $\lambda = 550-565$  нм), синим ( $\lambda = 450-480$  нм), голубым ( $\lambda = 480-510$  нм), лиловым ( $\lambda = 380-440$  нм) и желтым ( $\lambda = 565-590$  нм). На рисунке 2.24 представлена электронная схема модуля, на рисунке 2.25 – общая схема измерительного комплекса.



+5V Regulator



+5V AUTO SELECTOR



ICSP

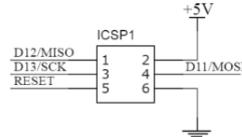


Рисунок 2.24 – Электрическая схема оптического модуля определения цвета породы

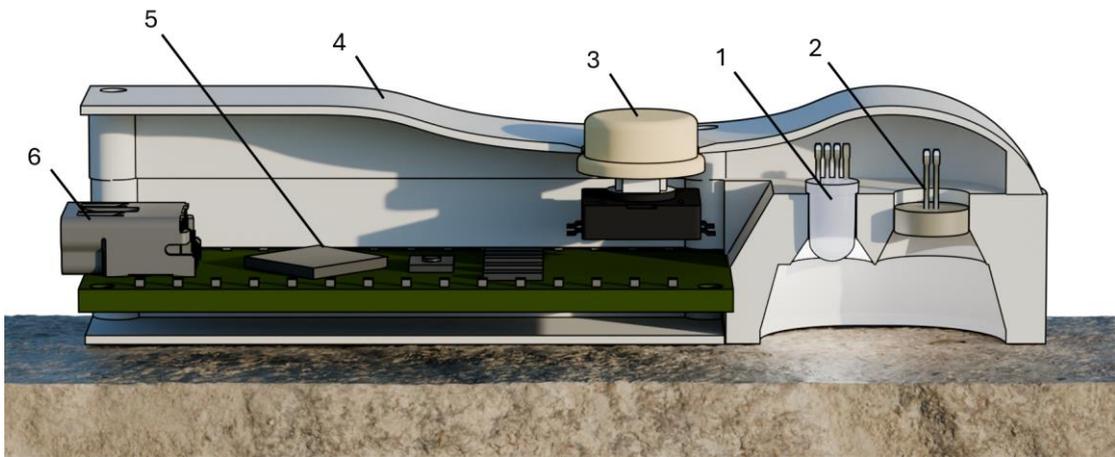


Рисунок 2.25 – Устройство оптического модуля определения цвета породы:  
 1 – светодиод, 2 – фоторезистор, 3 – кнопка регистрации, 4 – корпус, 5 – плата АЦП и регистрации, 6 – разъем подключения к компьютеру

Результат измерения  $I_o$  на различных длинах волн представлен на рисунке 2.26 в виде полярных диаграмм. Подобные полярные диаграммы представляют собой шестиугольники, каждый из которых характеризует цвет поверхности горной породы.

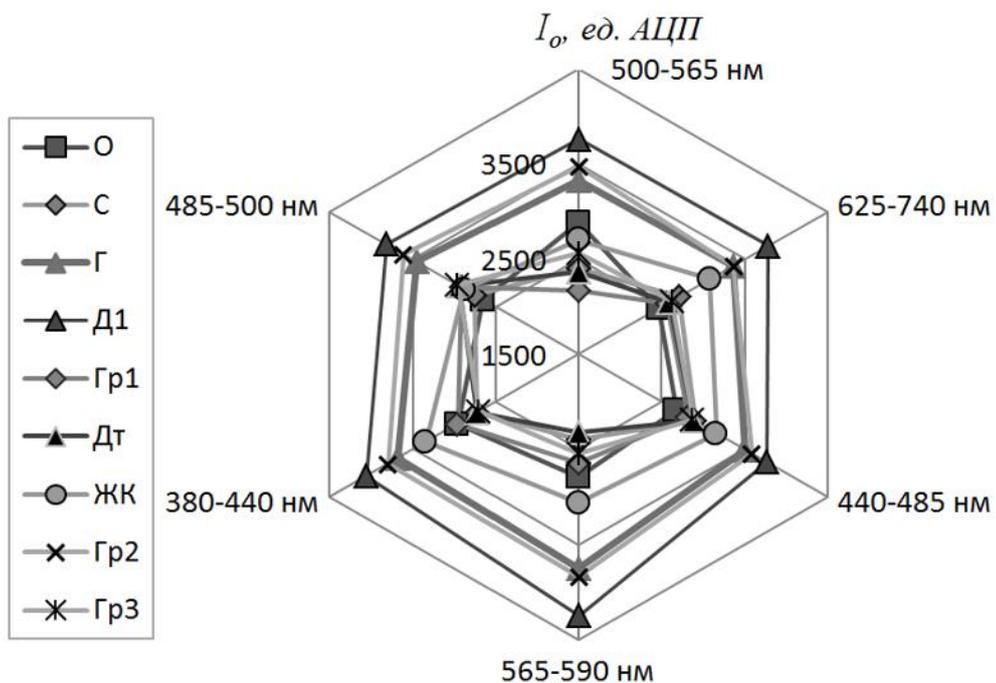


Рисунок 2.26 – Пример полученных полярных диаграмм распределения  $I_o$

Для удобства сравнения пород различных генотипов для каждой из полярных диаграмм были рассчитаны координаты  $X_{\bar{o}}$  и  $Y_{\bar{o}}$  центров масс (барицентров) шестиугольников, ограниченных полярными диаграммами

$$X_{\bar{o}} = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (2.12)$$

$$Y_{\bar{o}} = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (2.13)$$

где  $n$  – количество вершин многоугольника ( $n = 6$ ),  $A$  – площадь многоугольника, определяемая из выражения

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i|, \quad (2.14)$$

Результат расчетов приведен на рисунке 2.27.

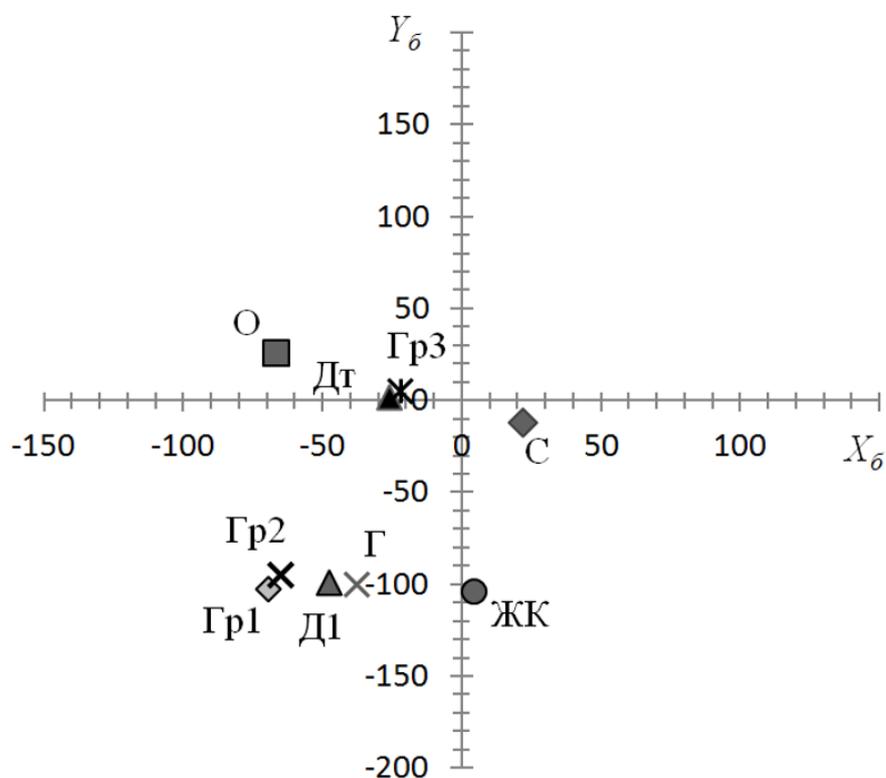


Рисунок 2.27 – Результаты расчета барицентров для всех групп образцов

Из рисунка 2.27 видно, что с помощью оптического сканирования оказывается возможным разделение различных типов пород. Слабо разделяются породы «серых» оттенков (группы «Гр1»-«Гр2» и «Дт»-«Гр3»). Повысить различимость таких пород можно путем дополнительного учета площади полярной диаграммы (что эквивалентно оценке отражающей способности поверхности по отношению к белому свету). Для этого к координатам барицентров можно добавить еще координату  $A$ . Пример совместного анализа параметров  $X_b$ ,  $Y_b$  и  $A$  представлен на рисунке 2.28.

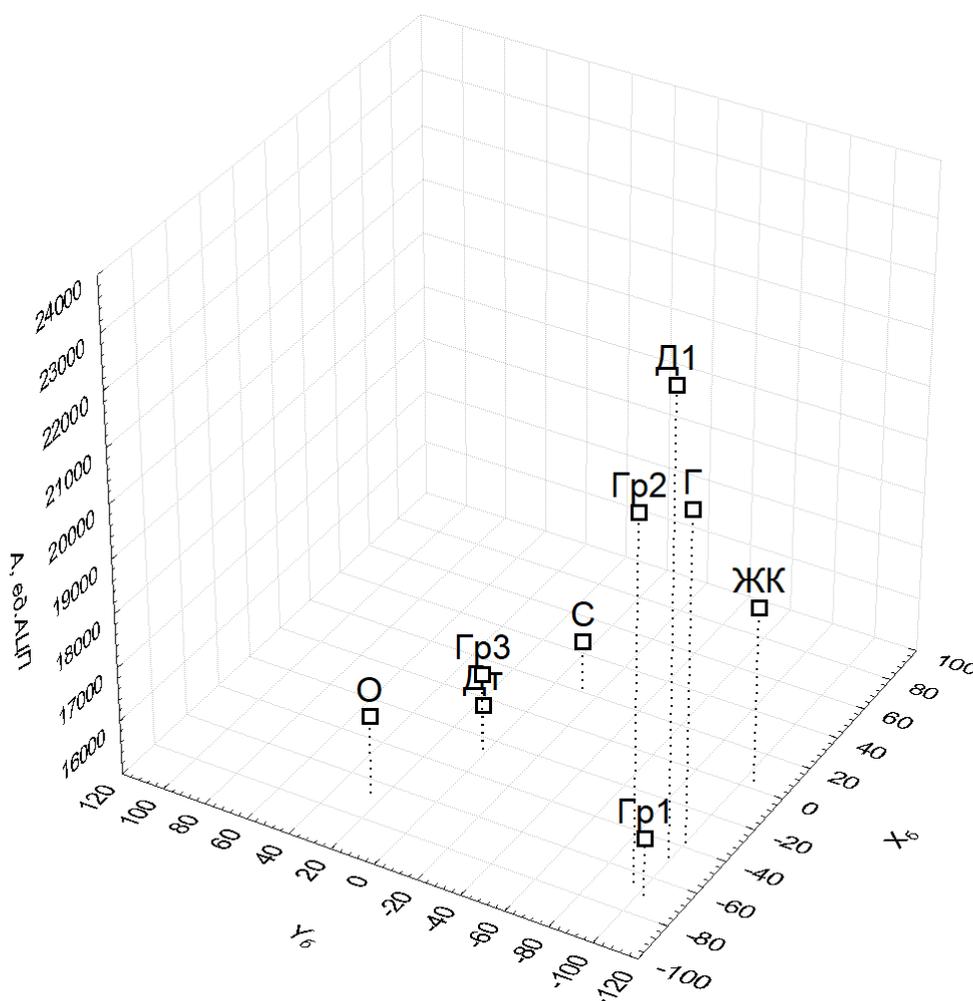


Рисунок 2.28 – Результаты совместного анализа  $X_b$ ,  $Y_b$  и  $A$  для всех исследованных образцов пород

Из рисунка 2.28 видно, что для некоторых горных пород, различимость которых с учетом  $X_b$  и  $Y_b$  была низкой, дополнительный учет параметра  $A$  приводит к резкому возрастанию различимости. Граниты групп Гр1 и Гр2 практически неразличимые на рисунке 2.27, оказываются разнесены по оси  $A$  на рисунке 2.28 на величину 5617 ед. АЦП, что составляет более 25% от значения  $A$  для образца группы Гр2. Таким образом, можно утверждать, что выделение участков отдельных пород вдоль оси измерительной скважины возможно осуществить по анализу отражающей способности поверхности породы, определяемой дискретно на различных длинах волн.

## **Выводы к главе 2**

В ходе исследования разработаны и обоснованы принципы дискретных оптических измерений, направленные на определение свойств горных пород. Подготовлена коллекция образцов различных пород, отобранных из нескольких месторождений, с учетом их геологического происхождения и особенностей структуры. Для подготовки образцов использовались специализированные станки и шлифовальные установки, обеспечивающие стандартизированные размеры и качество обработки поверхностей.

Была проведена оценка шероховатости поверхности горных пород путем измерения параметра  $R_a$ . Для этого применялся специализированный измерительный стенд, позволивший установить характерные значения шероховатости для различных пород. Полученные результаты подтвердили возможность использования усредненных значений шероховатости для дальнейших оптических исследований.

Разработан метод дискретного оптического выявления трещиноватости горных пород, основанный на анализе интенсивности отраженного света. Создан и апробирован одноканальный оптический модуль, позволяющий фиксировать снижение интенсивности света при прохождении над трещинами. Экспериментально подтверждено, что цвет и шероховатость поверхности влияют

на отражательную способность породы, но не оказывают решающего влияния на выявление трещин.

Для изучения трещиноватости в скважинных условиях разработан многоканальный оптический зонд, позволяющий автоматизированно фиксировать трещины и определять их углы падения и простирания. Проведенные эксперименты подтвердили высокую точность метода, особенно при использовании взвешенного метода наименьших квадратов для обработки данных.

Определена возможность использования оптического метода для оценки шероховатости стенок скважин, что может повысить точность интерпретации данных ультразвукового каротажа. Разработанный метод основан на измерении интенсивности рассеянного света, что позволило выделить характерные закономерности изменения коэффициента отражения в зависимости от шероховатости поверхности.

Дополнительно изучена возможность оптического определения типа горной породы путем анализа интенсивности отраженного света в разных спектральных диапазонах. Разработан подход, основанный на построении полярных диаграмм распределения отраженной световой интенсивности, что позволило успешно различать породы с разными оптическими характеристиками. Использование дополнительных параметров, таких как площадь полярной диаграммы, позволило повысить точность классификации пород.

Таким образом, разработанные принципы и аппаратное обеспечение продемонстрировали свою эффективность для решения задач изучения трещиноватости, оценки шероховатости и идентификации типа горных пород. Предложенные методы обладают высокой точностью, автоматизированностью и перспективностью для применения в области каротажа приконтурного массива горных пород

### **3 Проведение совместных акустических и оптических измерений на образцах горных пород**

#### **3.1 Влияние шероховатости породы на динамические и спектральные характеристики УЗ сигналов**

Как было отмечено в первой главе исследования, ультразвуковой каротаж скважин является одним из наиболее информативных методов геофизического исследования горных пород, позволяющий получать данные о их структуре, пористости, трещиноватости и других свойствах. Традиционно в интерпретации каротажных данных используют скорость продольных и поперечных волн, так как эти параметры напрямую связаны с упругими свойствами пород. Однако анализ амплитуд сигналов в последние годы получает всё большее распространение, поскольку он может давать более точные результаты при определении трещиноватости и пористости пород.

Одним из главных преимуществ использования амплитуд сигналов является их чувствительность к изменению структуры среды. Скорость продольных и поперечных волн зависит в первую очередь от минерального состава породы и её плотности, тогда как амплитуды волн сильнее реагируют на неоднородности, такие как поры и трещины. Когда ультразвуковая волна проходит через пористую или трещиноватую среду, значительная часть её энергии может рассеиваться или поглощаться, что приводит к уменьшению амплитуды. В результате анализ затухания сигнала может дать информацию о размере и количестве пустот в породе [137].

Дополнительно стоит учитывать, что в условиях насыщенности флюидом амплитудные характеристики сигналов могут быть более информативными, чем скорость волны. Жидкость или газ, заполняющие поры и трещины, влияют на амплитуду отражённых и проходящих волн, изменяя их коэффициент затухания. В случаях, когда пористость низка, но поры соединены в единую сеть, амплитудный анализ может выявить высокую проницаемость породы, что невозможно при использовании только

скоростных параметров [138].

Еще одним важным аспектом является влияние ориентации трещин. Скорости продольных и поперечных волн зависят от среднего упругого отклика породы и не всегда позволяют точно определить преобладающую ориентацию трещин. В то же время ультразвуковые эхо-сигналы, анализируемые по амплитуде в разных направлениях, позволяют более точно картировать трещинную сеть. Это особенно полезно при изучении пород с анизотропными свойствами, таких как сланцы или карбонаты, где традиционные скоростные методы могут давать усреднённые значения, не отражающие реальной картины трещиноватости [139].

Таким образом, использование амплитуд сигналов в ультразвуковом каротаже позволяет получить более детальную информацию о структуре породы, особенно в отношении её пористости и трещиноватости.

Однако следует принять во внимание, что в практике каротажных исследований измерения производятся в водонаполненных скважинах, излучение сигналов происходит с помощью цилиндрических преобразователей через слой воды. При исследовании свойств приконтурного массива часто приходится иметь дело с вертикальными или наклонными скважинами, полное заполнение водой которых невозможно. В этом случае обычно применяется пневмоприжим преобразователей к стенкам скважин с помощью специальных устройств. Одним из факторов, влияющим на надежность и информативность УЗ измерений в скважинах, является получение информации о качестве внутренней поверхности скважины – степени ее шероховатости. Неровности поверхности породы приводят к снижению общей площади контакта акустического преобразователя с массивом, увеличивают воздушную прослойку и существенно снижают эффективность ввода акустических колебаний в породный массив, особенно на ультразвуковом диапазоне частот.

С целью определения особенностей влияния шероховатости поверхности горных пород на параметры ультразвуковых сигналов в рамках

лабораторных исследований производилось поверхностное ультразвуковое прозвучивание подготовленных образцов по схеме, приведенной на рисунке 3.1.

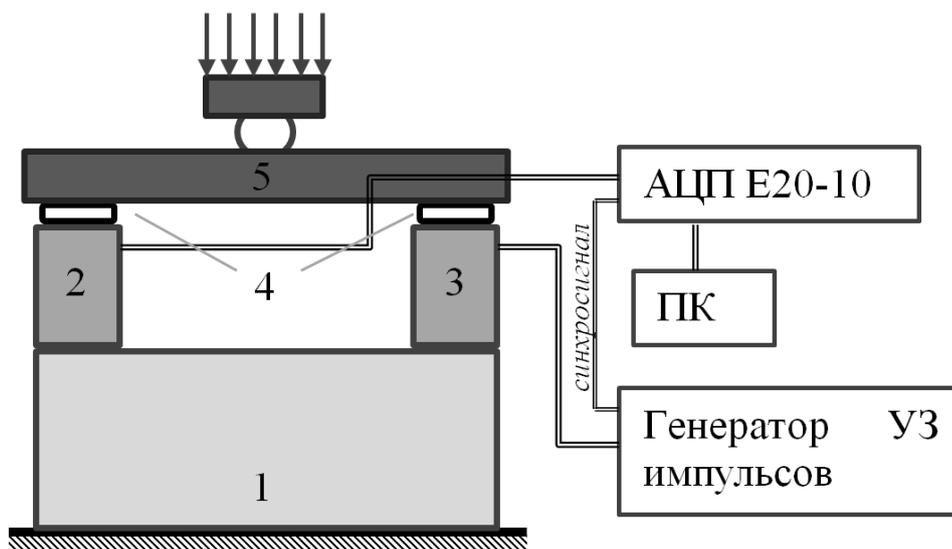


Рисунок 3.1 – Схема ультразвукового прозвучивания на образцах горных пород: 1 – образец; 2,3 – приемный и излучающий преобразователи; 4 – акустические развязки; 5 – стальная пластина

К боковой грани образца с помощью пресса (на рисунке не показан) прижимались излучающий и приемный преобразователь с резонансной частотой  $f_{рез} = 200$  кГц. Тем самым имитировалось проведение каротажных исследований в необводненных скважинах. Для предотвращения распространения сигнала через стальную прижимную пластину использовались акустические развязки, изготовленные из войлока. Регистрация принятого сигнала производилась с помощью подключенного к персональному компьютеру АЦП Е20-10 с частотой дискретизации 10 МГц. В практике каротажных измерений прижим преобразователей к стенке скважины осуществляется с помощью пневматических устройств. Поэтому для удобства дальнейшего использования полученных зависимостей усилие прижима, создаваемое прессом в лабораторных условиях, с учетом площади протекторов преобразователей пересчитывалось в давление  $P$ , измеряемое в атмосферах. В рамках исследований указанное давление изменялось в

диапазоне от 0 до 2,5 атм с шагом 0,5 атм. Пример волновых форм, зарегистрированных на образце Гр1 для шероховатости  $R_a = 10$  мкм, представлены на рисунке 3.2, а результаты при  $R_a = 200$  мкм – на рисунке 3.3

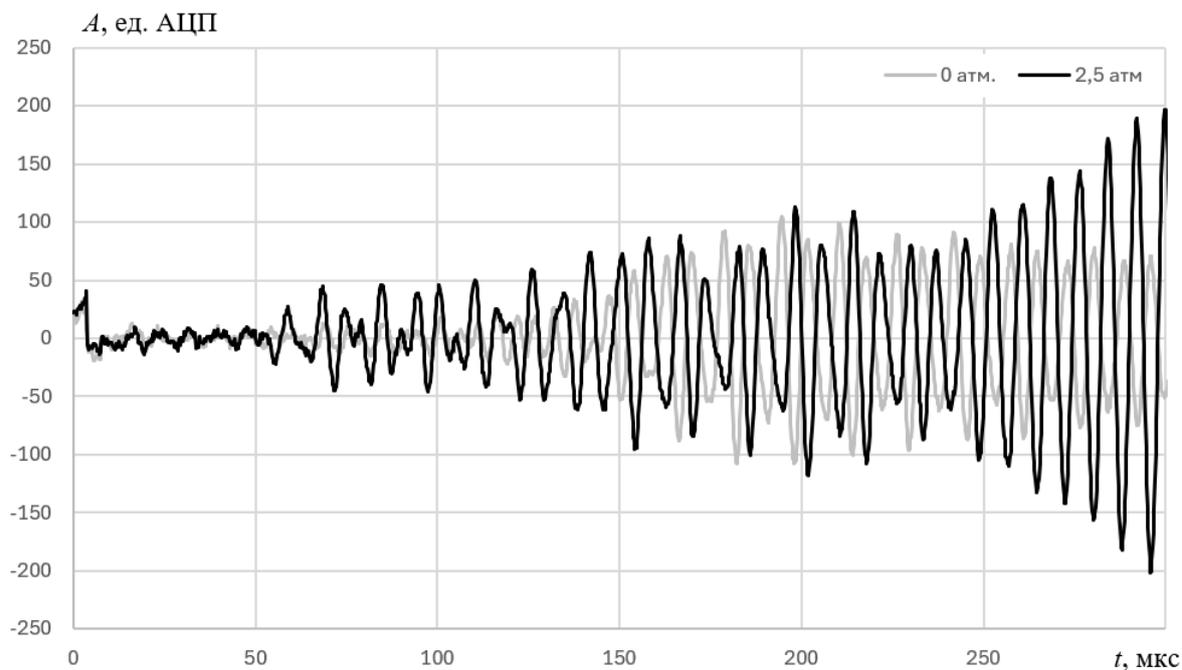


Рисунок 3.2 – Примеры волновых форм, зарегистрированных на поверхности образца Гр1 с шероховатостью  $R_a = 10$  мкм

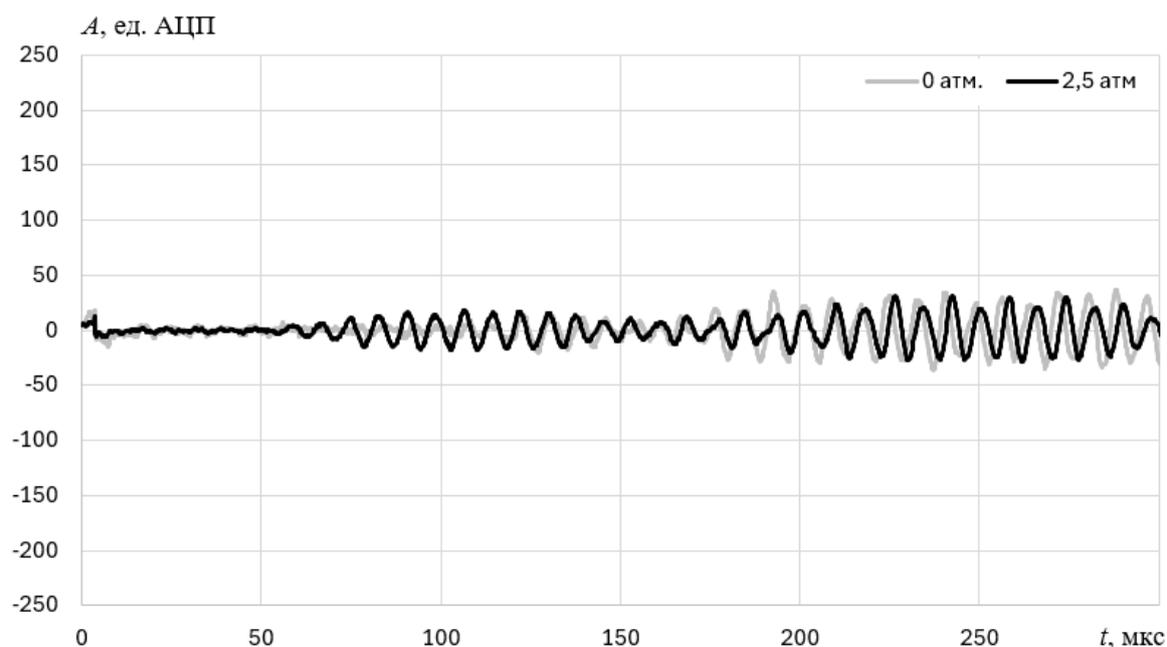


Рисунок 3.3 – Примеры волновых форм, зарегистрированных на поверхности образца Гр1 с шероховатостью  $R_a = 200$  мкм

При обработке результатов УЗ измерений в качестве основных информативных параметров выступали полная энергия сигналов  $E$  и эффективная ширина спектра  $\Delta\omega_{эф}$

$$E = \sum_{i=1}^n A_i^2, \quad (3.1)$$

$$\Delta\omega_{эф} = \frac{1}{F_{max} \int_0^{\infty} A(\omega) d\omega}, \quad (3.2)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала,  $F_{max}$  – максимальная амплитуда спектра сигнала  $A(\omega)$ .

На рисунке 3.4 представлены результаты расчета значений  $E$ . Для удобства значения  $E$  нормированы по максимальному значению в соответствии с

$$E_n = \frac{E}{E_{max}}, \quad (3.3)$$

где  $E_{max}$  – максимальное значение параметра  $E$ , определенное для выборки сигналов, зарегистрированных при различных значениях шероховатости  $R_a$  и усилиях прижима преобразователей.

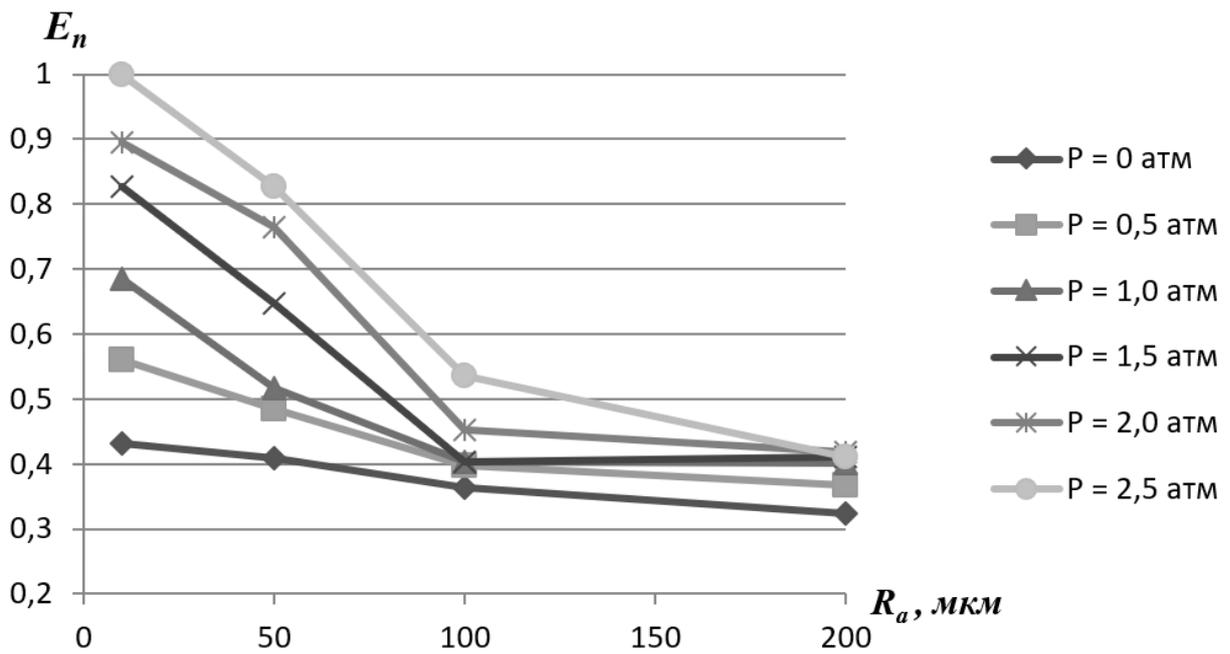


Рисунок 3.4 – Результат расчета  $E_n$

На рисунке 3.5 приведены результаты расчета  $\Delta\omega_{эфф}$ .

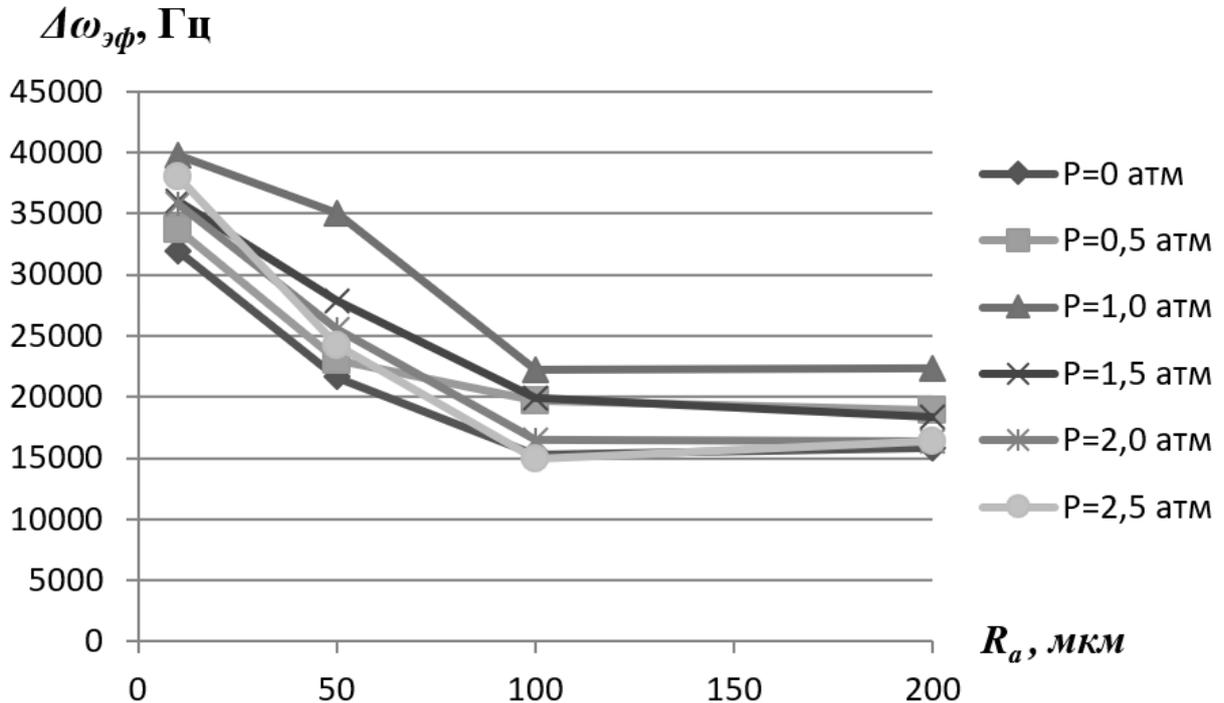


Рисунок 3.5 – Результат расчета  $\Delta\omega_{эфф}$

Из рисунка 3.4 видно, что увеличение шероховатости поверхности

горной породы приводит к снижению энергии УЗ сигналов. Шероховатость также существенно влияет на параметр  $\Delta\omega_{\text{эфф}}$ , в этом случае рост шероховатости приводит к сужению эффективной ширины спектра ультразвукового сигнала. Это, очевидно, связано с уменьшением общей площади контакта на границе «преобразователь-порода» и увеличением воздушной прослойки. Увеличение давления прижима снижает потери энергии УЗ импульсов. Так, при низких значениях  $R_a$  рост давления прижима до  $P = 2,5$  атм приводит к двукратному повышению энергии, что может быть объяснено частичным разрушением вершин неровностей и увеличением площади контакта преобразователя с породой. Увеличение параметра  $R_a$  не только приводит к потерям энергии, но и снижает роль прижимного давления, величины которого оказывается недостаточно для смятия неровностей. Таким образом, влияние шероховатости на энергию УЗ импульсов можно до определенной степени нивелировать с помощью управления силой прижима преобразователей. Это позволит в будущем при проведении каротажных измерений использовать динамические информативные параметры, гораздо более чувствительные к сомкнутым трещинам, чем традиционно используемые скорости продольных волн. Изменение давления прижима преобразователей не оказывало существенного влияния на ширину спектра УЗ импульсов. В значительной мере это может ограничить будущее применение спектральных информативных параметров при реализации скважинных ультразвуковых измерений с применением «сухого» акустического контакта.

### **3.2 Оценка влияния анизотропии и трещиноватости пород на параметры поперечных волн с изменяемым вектором поляризации**

При ультразвуковом исследовании трещиноватости в горных породах важную роль играют взаимодействия продольных и поперечных волн с трещинами, поскольку эти взаимодействия позволяют оценить наличие и характеристики трещин.

При прохождении через горные породы продольные волны, в которых

частицы среды перемещаются вдоль направления распространения волны, сталкиваются с неоднородностями, искажения структуры материала приводят к изменению параметров, (скорости распространения и амплитуды) волны вследствие отражения, преломления и рассеяния на разломах и трещинах. При этом трещины, ориентированные в определённом направлении относительно направления движения волны, могут вызывать значительное затухание сигнала и появление дополнительных фаз, что позволяет оценить степень повреждения породы [140].

Поперечные же волны, характеризующиеся перемещением частиц перпендикулярно направлению распространения, особенно чувствительны к сдвиговым деформациям и эффективнее возбуждают резонансы вблизи трещин, благодаря чему их взаимодействие с трещинами проявляется в изменениях фазы и усилении эффектов многократного отражения внутри открытых трещин [141]. Эти особенности приводят к тому, что поперечные волны могут выявлять не только наличие трещин, но и давать представление о их геометрии и ориентации.

Таким образом, можно сделать вывод, что для выявления трещин в горных породах более эффективными являются поперечные волны, поскольку они за счёт своей природы более чувствительны к сдвиговым деформациям, характерным для повреждённого или трещиноватого материала, и позволяют точнее диагностировать микроструктурные изменения, хотя применение продольных волн остаётся необходимым для комплексной оценки состояния породы. Приведенные выше выводы справедливы и при изучении слоистых высокоанизотропных пород.

На сегодняшний день, однако, применение поперечных волн в неводозаполненных скважинах сталкивается с рядом существенных аппаратных ограничений. В большинстве случаев для каротажа подобных скважин используются многоэлементные зонды, в которых сигнал с одного излучающего преобразователя принимается двумя или более приемными преобразователями. Время прихода поперечной волны  $t_p$  выделяют по

характерным точкам волновой формы – резкому увеличению амплитуды сигнала, а также так называемому слою фаз. Схема каротажа многоэлементным зондом и соответствующие волновые формы проиллюстрированы рисунком 3.6.

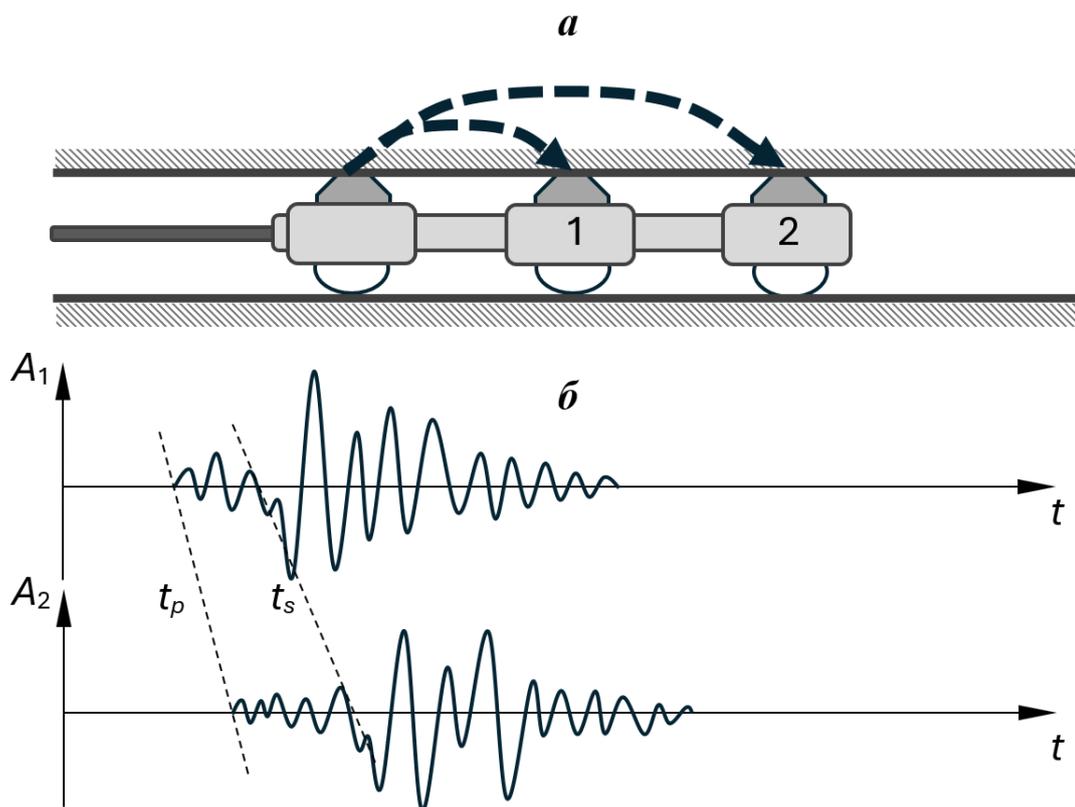


Рисунок 3.6 – Схема каротажа многоэлементным зондом (а) и волновые формы с выделенными временами  $t_p$  и  $t_s$  (б)

При реализации измерений по схеме рисунка 3.6а возможно выделить поперечные волны, однако надежность такого выделения остается низкой, т.к. далеко не во всех случаях удастся точно выделить первое вступление поперечной волны на фоне колебаний продольной волны. Кроме того, очевидно, что при такой схеме каротажа технически невозможно изменить вектор поляризации поперечной волны, который в данном случае направлен вдоль оси акустических преобразователей.

Значительно повысить эффективность применения поперечных волн для исследования анизотропии и трещиноватости пород могло бы использование

специализированных преобразователей поперечных волн с изменяемым вектором поляризации.

Первым этапом обоснования такой возможности стало лабораторное исследование влияния угла между вектором поляризации поперечных волн и плоскостью трещины или направлением слоев в анизотропных породах.

Исследования производились на специально подготовленных образцах горных пород. Всего было подготовлено три группы по пять образцов: группа «Гр», представленная изотропным гранитом Мансуровского месторождения; группа «ЖК», представленная слоистым железистым кварцитом КМА; группа «Г», представленная гипсом с доломитовыми включениями Новомосковского месторождения. В дополнение ненарушенным образцам были подготовлены образцы гранита, содержащие магистральную трещину, пересекающую образец перпендикулярно его оси (группа «Гр»). Более подробное описание образцов представлено в п. 2.1. Внешний вид образцов представлен на рисунке 3.7.

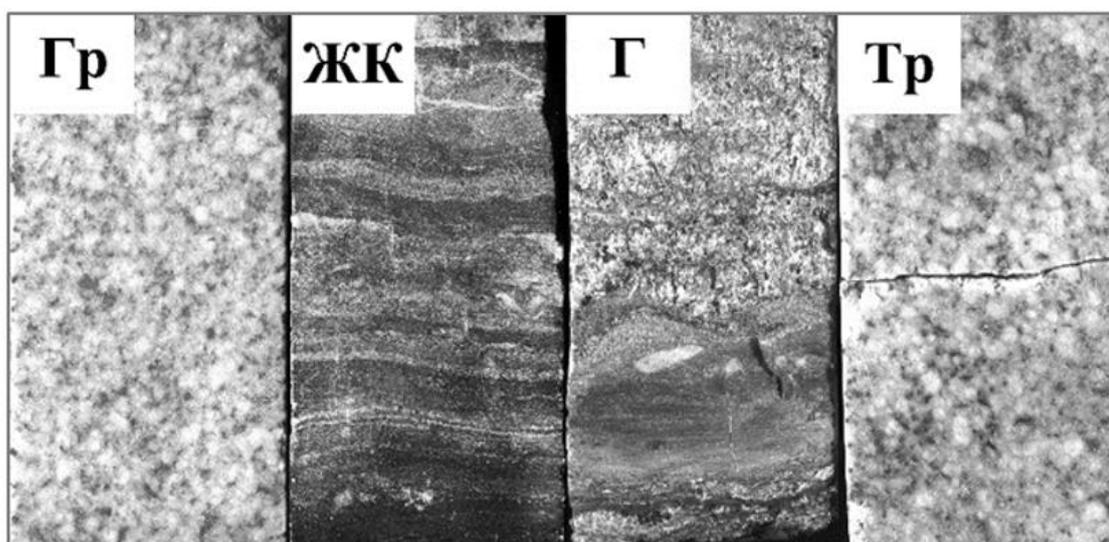


Рисунок 3.7 – Образцы горных пород

Для установления влияния анизотропии образцов на параметры поперечных волн был подготовлен стенд, состоящий из двух преобразователей поперечных волн с точечным акустическим контактом

S1802 0.05A0D2PS, генератора ультразвуковых сигналов, предусилителя ПАЭФ-014 и аналого-цифрового преобразователя Е20-10 с частотой дискретизации 5 МГц, подключенного к персональному компьютеру. Программное обеспечение позволяло в автоматизированном режиме определять амплитуду и скорость поперечных волн, а также сохранять полные волновые формы ультразвуковых колебаний. Общая схема прозвучивания приведена на рисунке 3.8

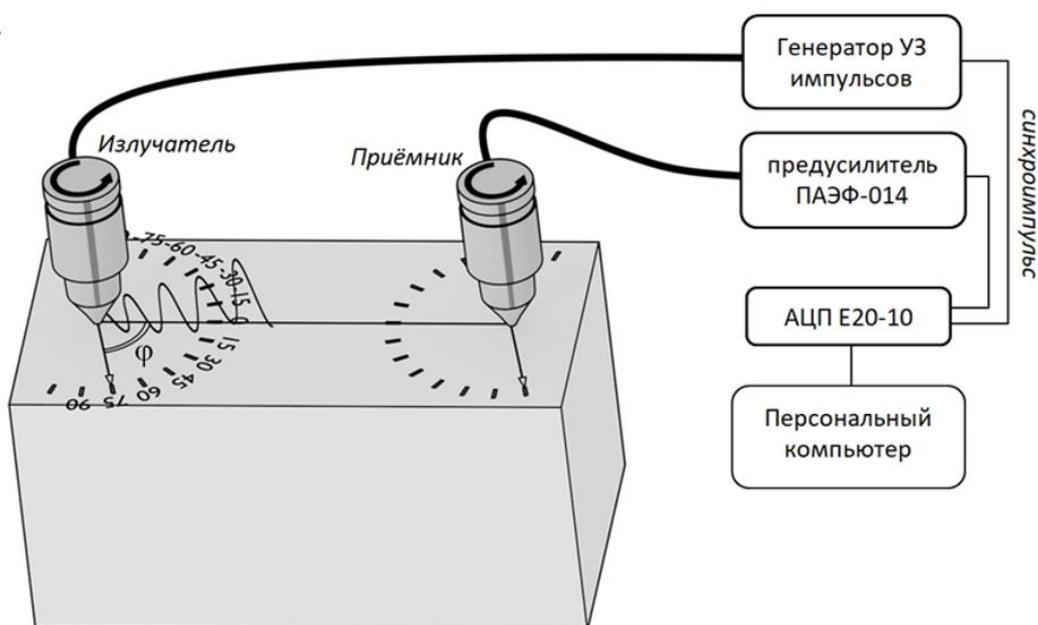


Рисунок 3.8 – Схема ультразвукового прозвучивания

На боковой поверхности образца устанавливались и закреплялись акустические преобразователи. Усилие прижима на протяжении эксперимента оставалось фиксированным и равным 10 Н и достигалось использованием металлического груза. Излучающий и приемный преобразователи располагались так, чтобы векторы поляризации поперечных волн оказывались параллельными, а угол  $\varphi$  между направлением колебания частиц и длинной гранью образца составлял  $90^\circ$ . Измерения производились с шагом  $\varphi = 15^\circ$  в диапазоне от минус  $90^\circ$  до плюс  $90^\circ$ . Таким образом, для каждого образца формировался массив из 13 волновых форм, содержащих информацию об

амплитудах, скоростях и спектральном составе поперечных волн. Пример зарегистрированных волновых форм для образца «Тр» представлены на рисунке 3.9.

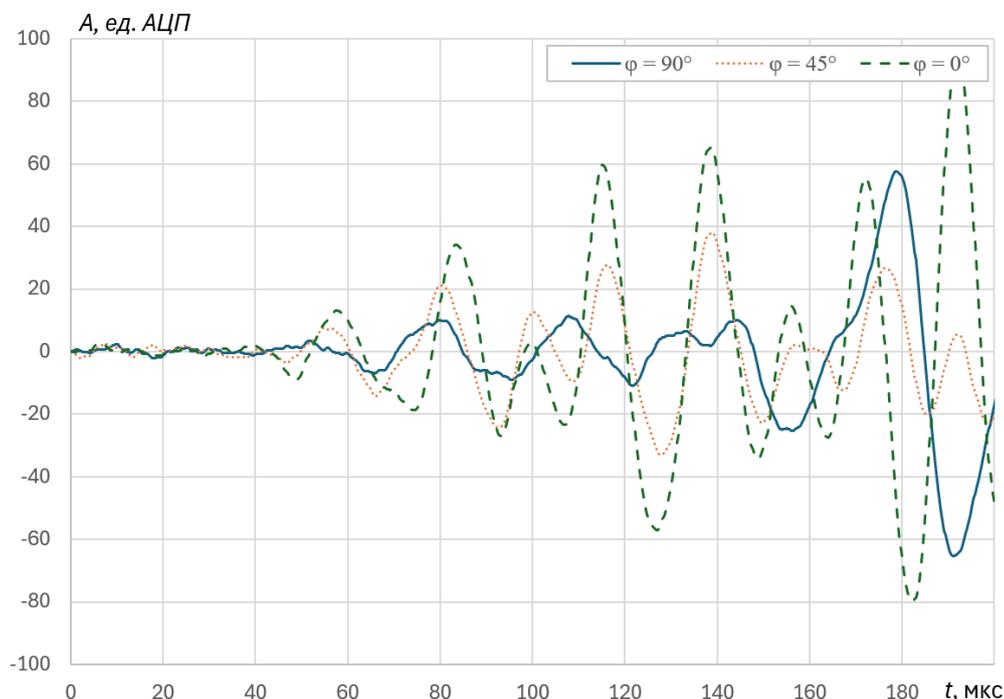


Рисунок 3.9 – Пример волновых форм, зарегистрированных при различных углах  $\varphi$  при прозвучивании образца «Тр»

Основным информативным параметром при измерениях на образцах была выбрана амплитуда поперечных волн из-за ее высокой чувствительности к трещинам и слоистым структурам. Затухание поперечной волны значительно возрастает при прохождении через сомкнутые трещины, а раскрытие трещин приводит к полному исчезновению подобных колебаний из-за пренебрежимо малых значений модуля сдвига в заполнителе трещин (газе или жидкости). На рисунке 3.10. представлены результаты расчета приращений амплитуды поперечной волны  $\Delta A_S$  относительно минимально зафиксированной  $A_{Smin}$ .

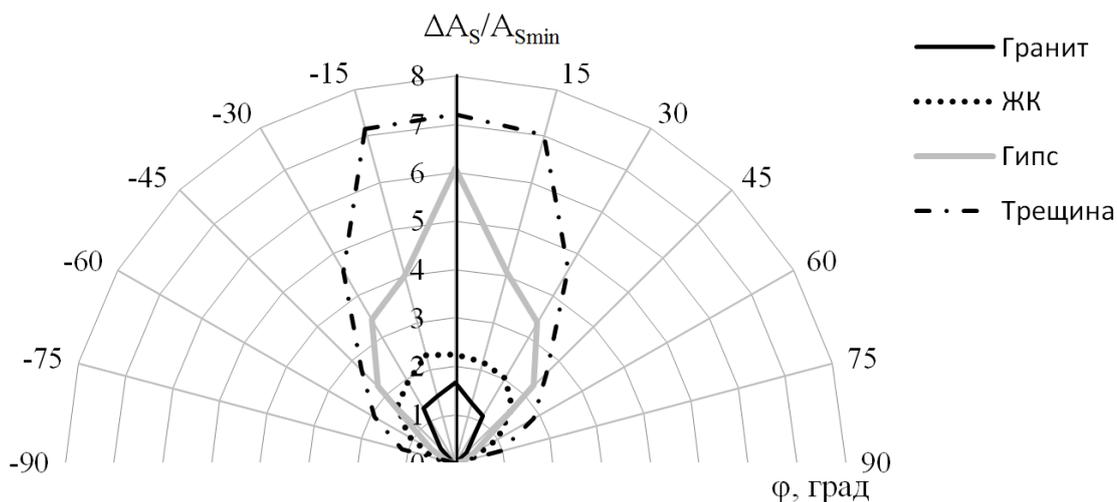


Рисунок 3.10 – Результаты экспериментального определения  $A_s(\phi)/A_{Smin}(\phi)$

Из рисунка 3.10 видно, что с ростом степени анизотропии значения  $\Delta A_s/A_{Smin}$  увеличиваются, при этом в большей степени при  $\phi = 0^\circ$ . Наибольшее изменение амплитуды наблюдается в случае наличия трещины. Полученные закономерности объясняются механизмом взаимодействия поперечных волн с границами слоев и берегами трещин. При углах  $\phi = \pm 90^\circ$  направление сдвиговых колебаний оказывается параллельным напластованию (для образцов ЖК и Г) и берегам магистральной трещины (для образца «Тр»). В этом случае снижение амплитуд поперечных волн связана с различием модулей сдвига  $G$  на границах. При этом прохождение поперечных волн возможно только через сомкнутые трещины, в случае заполнения трещин водой или воздухом поперечные волны будут полностью исчезать из-за пренебрежимо малых значений  $G$ . При угле  $\phi = 0$  направление смещения частиц ортогонально плоскостям напластования и трещине. В этом режиме модуль сдвига не участвует в передаче энергии УЗ колебаний (фактически в данном случае прохождение поперечных волн через границы будет аналогично прохождению продольных волн). Таким образом, об угле между трещиной (слоистостью) и осью скважины можно судить по максимуму диаграммы  $A_s(\phi)/A_{Smin}(\phi)$ .

### **Выводы по главе 3**

В ходе исследования были проведены совместные акустические и оптические измерения на образцах горных пород с целью оценки влияния различных факторов на характеристики ультразвуковых сигналов.

Проведенные лабораторные исследования продемонстрировали значительное влияние шероховатости поверхности породы на динамические и спектральные характеристики ультразвуковых сигналов. Установлено, что увеличение шероховатости приводит к снижению энергии УЗ импульсов и уменьшению ширины спектра за счет ухудшения контакта между преобразователем и породой. При этом увеличение давления прижима преобразователя частично компенсирует потери энергии, особенно при малых значениях шероховатости, однако при значительных неровностях эффект прижима оказывается недостаточным для полного восстановления качества акустического контакта.

Дополнительно была проведена оценка влияния анизотропии и трещиноватости пород на параметры поперечных волн. Установлено, что поперечные волны демонстрируют высокую чувствительность к сдвиговым деформациям и позволяют выявлять ориентацию трещин за счет анализа изменений их амплитуды. Показано, что для высокоанизотропных пород традиционные методы каротажа могут давать усредненные значения, не позволяющие точно определить ориентацию трещинной сети.

Разработан и испытан специализированный стенд для изучения распространения поперечных волн в анизотропных и трещиноватых породах. В ходе экспериментов измерения проводились при изменяемом векторе поляризации поперечной волны, что позволило выявить зависимость амплитуды от ориентации трещин и напластования породы. Наибольшие изменения амплитуды наблюдаются при направлениях колебаний, ортогональных плоскостям трещин и слоев, что позволяет использовать данный метод для определения углов наклона трещин в скважинных условиях.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность комплексного применения акустических и оптических методов для анализа

структуры горных пород. Выявлены особенности влияния шероховатости, анизотропии и трещиноватости на распространение ультразвуковых сигналов, что позволит в дальнейшем повысить точность интерпретации данных каротажа и геофизических исследований.

## **4 Разработка аппаратного и методического обеспечения комплексного оптико-акустического каротажа скважин**

### **4.1 Комплексный оптико-акустический каротажный комплекс**

Результаты экспериментальных исследований, приведенные во второй и третьей главе настоящей работы, указывают на высокий потенциал проведения совместных ультразвуковых и дискретных оптических каротажных измерений для оценки строения и состояния приконтурного массива горных пород. Однако на сегодняшний день не существует серийно выпускаемого оборудования, с помощью которого можно было бы подобные измерения реализовать. Для реализации каротажных измерений был разработан и изготовлен макетный образец каротажного комплекса, позволяющий реализовать описанную выше концепцию комплексирования оптических и акустических измерений [142].

Общий вид разработанного оптико-акустического каротажного комплекса приведен на рисунке 4.1.

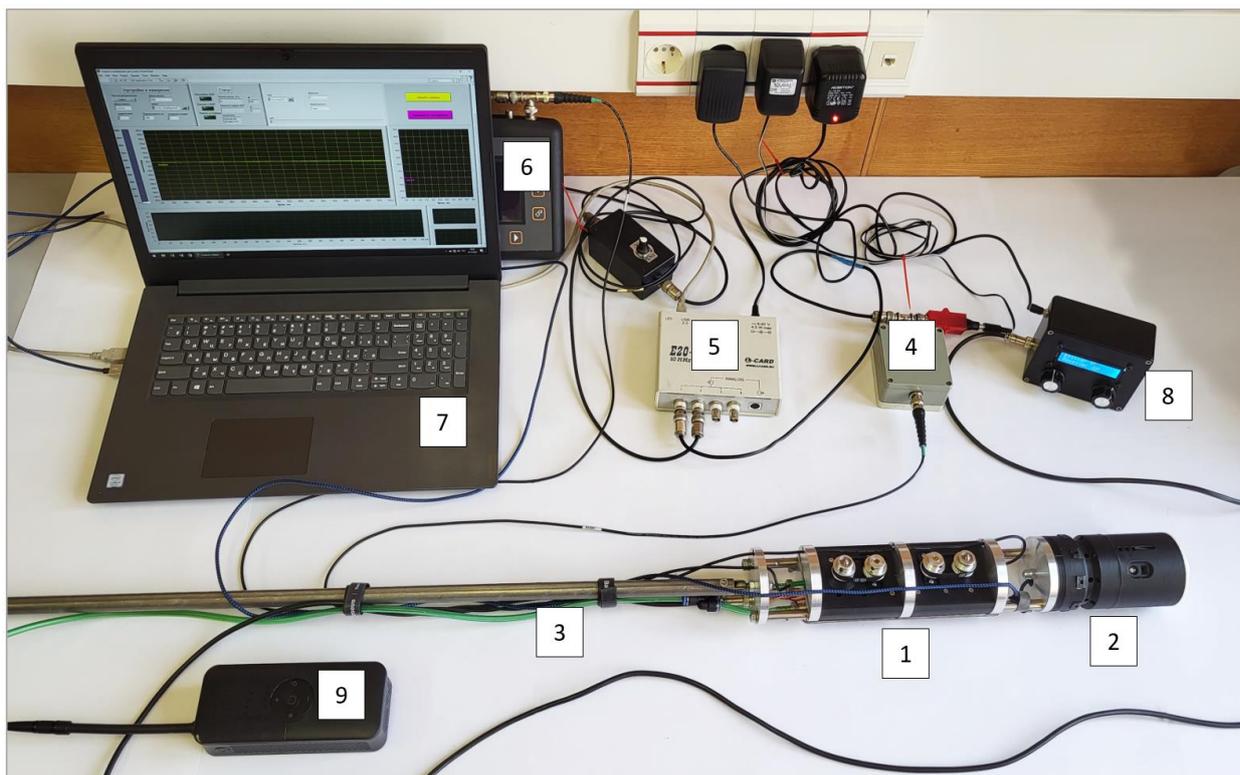


Рисунок 4.1 – Общий вид опто-акустического каротажного комплекса: 1 – модуль УЗ прозвучивания; 2 – оптический модуль; 3 – досылочное устройство; 4 – предусилитель; 5 – АЦП; 6 – генератор УЗ импульсов; 7 – персональный компьютер; 8 – блок управления сервоприводами поворота УЗ преобразователей; 9 – пневматический насос системы прижима

Основой каротажного комплекса является специально разработанный каротажный зонд, состоящий из модулей ультразвуковых и оптических измерений. УЗ модуль состоит из двух пьезоэлектрических преобразователей поперечных волн S1802 0.05A0D2PS с резонансной частотой 50 кГц, и сервоприводов, позволяющих, вращая преобразователи, изменять угол между вектором поляризации  $S$ -волны и осью скважины. Управление сервоприводами осуществляется с управляющего модуля, связанного с зондом многожильным экранированным кабелем. Прижим преобразователей к стенке скважины осуществляется пневматической системой и насосом с цифровым манометром. База прозвучивания составляет 200 мм. Схема и разрез ультразвукового модуля представлены на рисунке 4.2

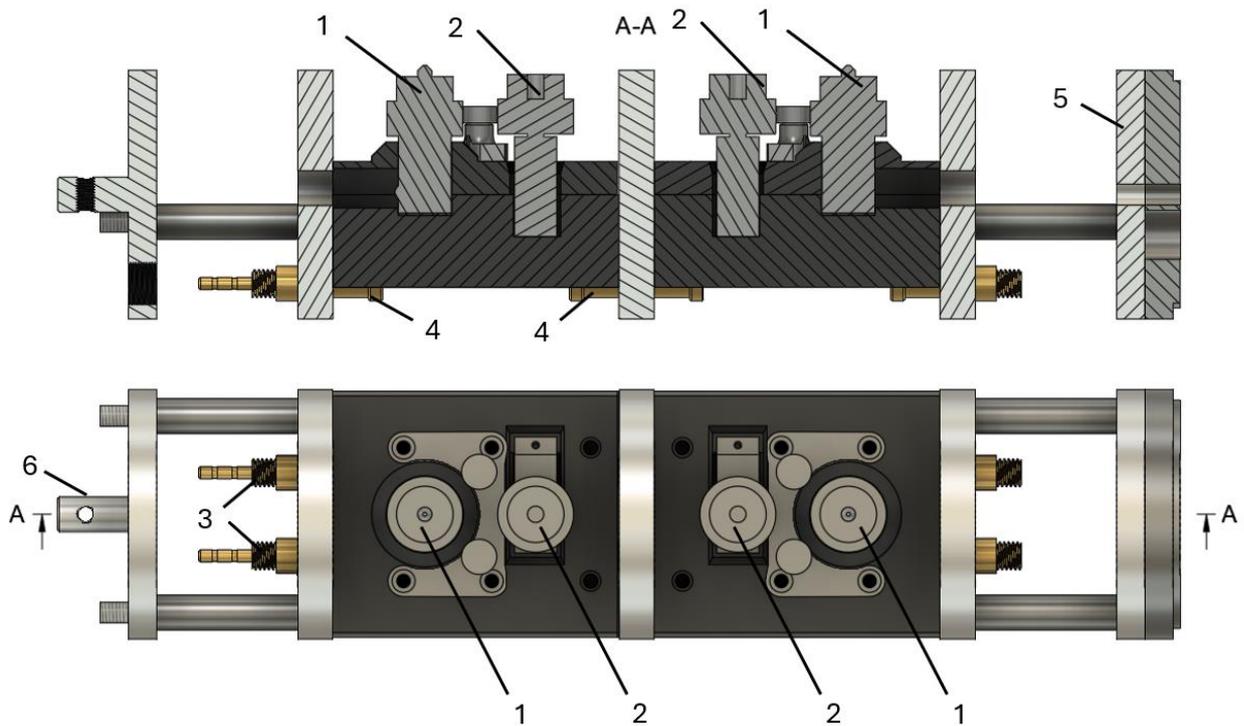


Рисунок 4.2 – Ультразвуковой модуль: 1 – ультразвуковые преобразователи, 2 – сервоприводы управления направлением вектора поляризации, 3 – штуцеры подключения пневмомагистрали, 4 – штуцеры подключения баллонов пневмоприжима, 5 – планшайба для присоединения оптического модуля, 6 – узел крепления разборных досылочных штанг

Модуль позволяет определять скорости распространения и амплитуды продольных и поперечных волн, а также (в случае записи полных волновых форм) весь набор спектральных параметров.

Оптический модуль предназначен для бесконтактного определения степени шероховатости поверхности скважины, а также выявления трещин, пересекающих скважину и оценки их ориентации в пространстве. В основе работы модуля лежит принцип измерения интенсивности отраженного от стенки скважины светового излучения (как обычного на разных длинах волн, так и лазерного). Подробно конструкции оптических модулей, а также результаты их испытаний описаны во второй главе настоящего исследования, а также в работах [143, 144, 145].

#### 4.2 Проверка работоспособности оптико-акустического каротажного комплекса на физической модели скважины

Работоспособность каротажного комплекса была подтверждена при измерениях в физической модели измерительной скважины. Модель скважины представляла собой цилиндр, изготовленный из песчано-цементной смеси с внешним диаметром 200 мм, в центре которого была оборудована скважина диаметром 76 мм. Общая длина модели составляла 1500 мм. На отметках 700 и 1000 мм в модели были созданы две магистральные трещины, ортогонально пересекающие скважину. Первая трещина имела раскрытие 1 мм и была полностью заполнена глиной, вторая трещина, также с раскрытием 1 мм, оставалась незаполненной. На участке от 700 до 1000 мм с помощью шарошки на внутренней поверхности скважины была нанесена фактурная поверхность с шероховатостью  $R_a \approx 200$  мкм (для остальных участков модели  $R_a \approx 50$  мкм) в соответствии с ГОСТ 2789-73. Общий вид физической модели с размещенным в ней оптико-акустическим зондом представлен на рисунке

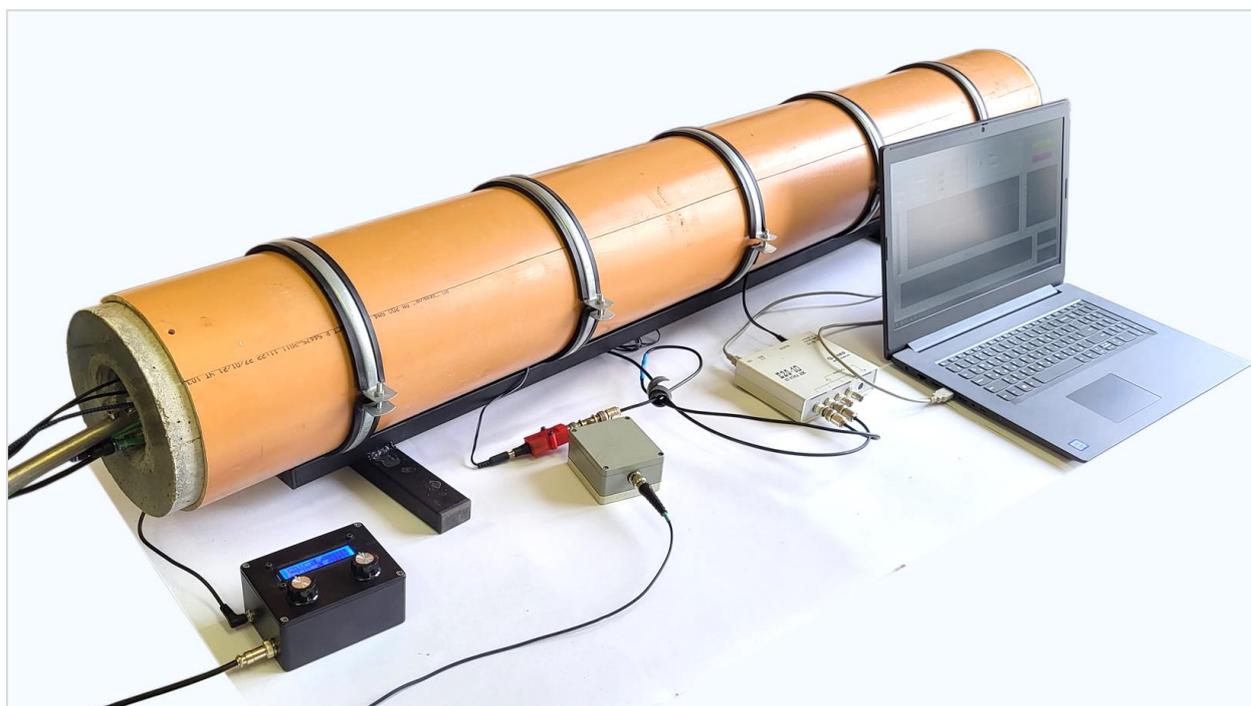


Рисунок 4.3 – Проведение оптико-акустического каротажа на физической модели скважины

Акустические измерения производились с шагом 50 мм, при этом в каждой точке осуществлялась регистрация 7 волновых форм для углов  $\varphi$

между направлением вектора поляризации  $S$ -волн и осью скважины в диапазоне  $-45^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом  $15^\circ$ . Шаг оптических измерений составлял 5 мм. Основными информативными параметрами выступали: для оценки шероховатости - интенсивность рассеянного на неровностях лазерного излучения  $I_{ш}$ ; для определения наличия и ориентации трещины – интенсивность света  $I_{1..8}^{mp}$ , измеренная 8 светочувствительными элементами, расположенными с шагом  $45^\circ$  по периметру зонда (см. рисунок 2.9). Оптический модуль определения цвета поверхности породы в данном исследовании не участвовал.

Результатом измерений на физической модели стали каротажные диаграммы, представленные вместе со схемой скважины на рисунке 4.4. Поскольку точки измерений располагаются в разных местах зонда, для совмещения каротажных диаграмм были введены соответствующие поправки. Точкой получения всей измерительной информации считается середина базы прозвучивания УЗ модуля каротажного зонда.

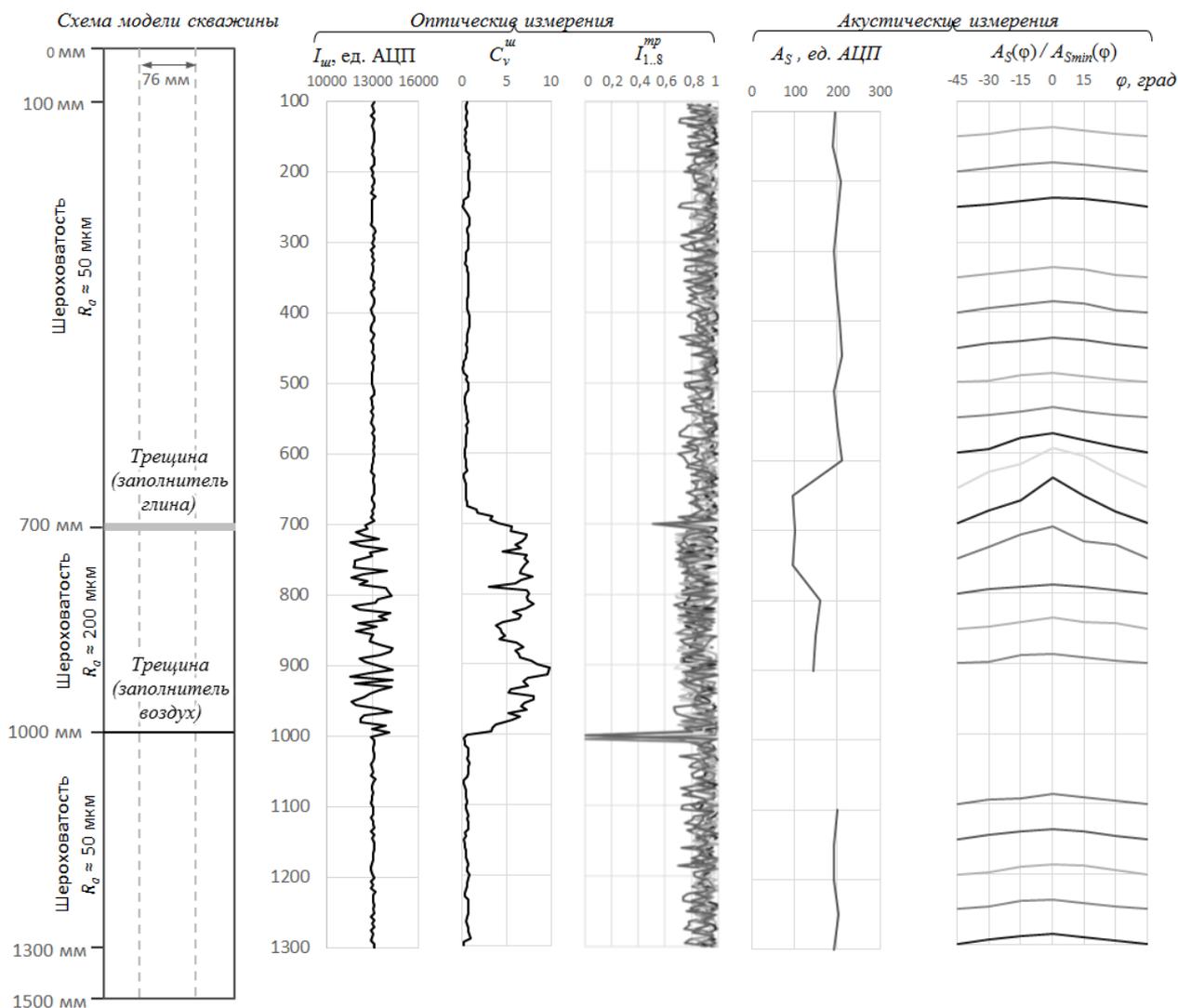


Рисунок 4.4 – Каротажные диаграммы, полученные на физической модели скважины

Набор каротажных диаграмм состоит из двух блоков, соответствующих оптическим и акустическим измерениям. В дополнение к измеренным значениям  $I_{III}$  был для них был рассчитан коэффициент вариации  $C_v^{III}$  в скользящем окне шириной  $n = 10$ . На рисунке 4.4 видно, что при входе зонда в зону с высокой шероховатостью значения  $C_v^{III}$  резко возрастают. Увеличение шероховатости также сказывается на уровне амплитуд поперечной волны на участке от 800 до 900 мм, где средние значения  $A_S$  оказываются на 25 % ниже, чем на участках с низкой шероховатостью (например, на участке от 100 до 600 мм). В данном случае снижение амплитуд можно однозначно трактовать как следствие ухудшения контактных условий на границе «преобразователь-

массив», а не нахождения на базе прозвучивания зоны нарушения сплошности массива.

Каротажные кривые, полученные оптическим модулем поиска трещин, указывают на возможное присутствие двух трещин на отметках 700 и 1000 мм, которые выявляются по резкому снижению интенсивности отраженного света на всех 8 фоточувствительных элементах. Совпадение отметок минимальных значений интенсивности отраженного света  $I_{1..8}^{mp}$  указывает на ортогональное расположение трещины, однако аномалия на отметке 700 мм отличается низким соотношением сигнал/шум (менее 2/1) из-за присутствия глины в трещине. При таком соотношении результаты оптического сканирования не могут считаться достоверными. Подтверждением наличия трещины в данном случае являются результаты ультразвукового прозвучивания. В районе отметки 700 мм наблюдается резкое (более чем на 50 %) снижение  $A_S$ , а также искажение линий диаграммы  $A_S(\varphi)/A_{Smin}(\varphi)$ . При этом в указанной зоне максимум отношения  $A_S/A_{Smin}$  наблюдается при  $\varphi = 0^\circ$ , что также указывает на ортогональность трещины по отношению к оси скважины. В зоне расположения трещины с воздушным заполнением на акустических диаграммах измеренные значения отсутствуют из-за невозможности регистрации поперечных волн, которые не могут распространяться в жидкостях и газах (реальное раскрытие трещины составляло  $\approx 0,5$  мм).

Таким образом, повышение производительности и надежности каротажных измерений в приконтурном массиве пород может быть достигнуто путем комплексирования результатов оптического сканирования и ультразвукового прозвучивания.

Разработанное оборудование позволяет в единой системе координат размещать и анализировать информацию об особенностях строения поверхности скважины, полученную оптическими модулями, а также информацию о строении прискважинного массива, полученную путем прозвучивания пород поперечными волнами с изменяемым вектором поляризации.

### 4.3 Метод оптико-акустического каротажа приконтурного массива пород

В результате проведенных исследований был сформулирован метод оптико-акустического каротажа приконтурного массива пород, заключающихся в следующем.

На выбранном участке бурится измерительная скважина диаметром 76мм, в которой размещается специализированный оптико-акустический зонд. На первом этапе производятся высокопроизводительные оптические измерения, позволяющие установить:

- распределение уровня шероховатости стенки скважины вдоль профиля сканирования (параметр, необходимый для последующей интерпретации акустических каротажных диаграмм);

- возможное местоположение и углы падения и простирания трещин, пересекающих измерительную скважину;

- границы пород различных генотипов, слагающих приконтурный массив и отличающихся по цвету.

По результатам оптического сканирования выделяют аномальные области, свойства которых необходимо дополнительно уточнять с применением более чувствительных, но и более трудоемких акустических измерений. К признакам подобных аномальных областей относятся зарегистрированные восьмиканальным модулем поиска трещин резкие снижения интенсивности отраженного света, резкое изменение цвета пород, резкое изменение шероховатости стенки скважины (может быть связано с изменением твердости пород).

В указанных зонах производят акустические измерения с шагом не более 50 мм, позволяющие:

- подтвердить наличие и наклон трещин, пересекающих скважину. По характеру диаграмм амплитуд поперечных волн также судят о материале заполнителя трещин (снижение  $A_s$  свидетельствует о сомкнутых или залеченных трещинах, невозможность регистрации  $A_s$  – о заполнении трещин

водой или воздухом). В случае нахождения нескольких трещин, пересекающих скважину, анализ значений  $A_s$  производится с учетом ранее оцененной шероховатости;

- подтвердить границу между породами различных генотипов по изменению на этой границе акустических свойств, таких как скорости продольных и поперечных волн  $V_p$ ,  $V_s$ , а также амплитуд поперечных волн  $A_s$ ;
- подтвердить или опровергнуть снижение прочности пород по значениям  $V_p$  в зоне резкого изменения шероховатости.

На рисунке 4.5 схематично представлен алгоритм проведения комплексного оптико-акустического каротажа приконтурного массива.

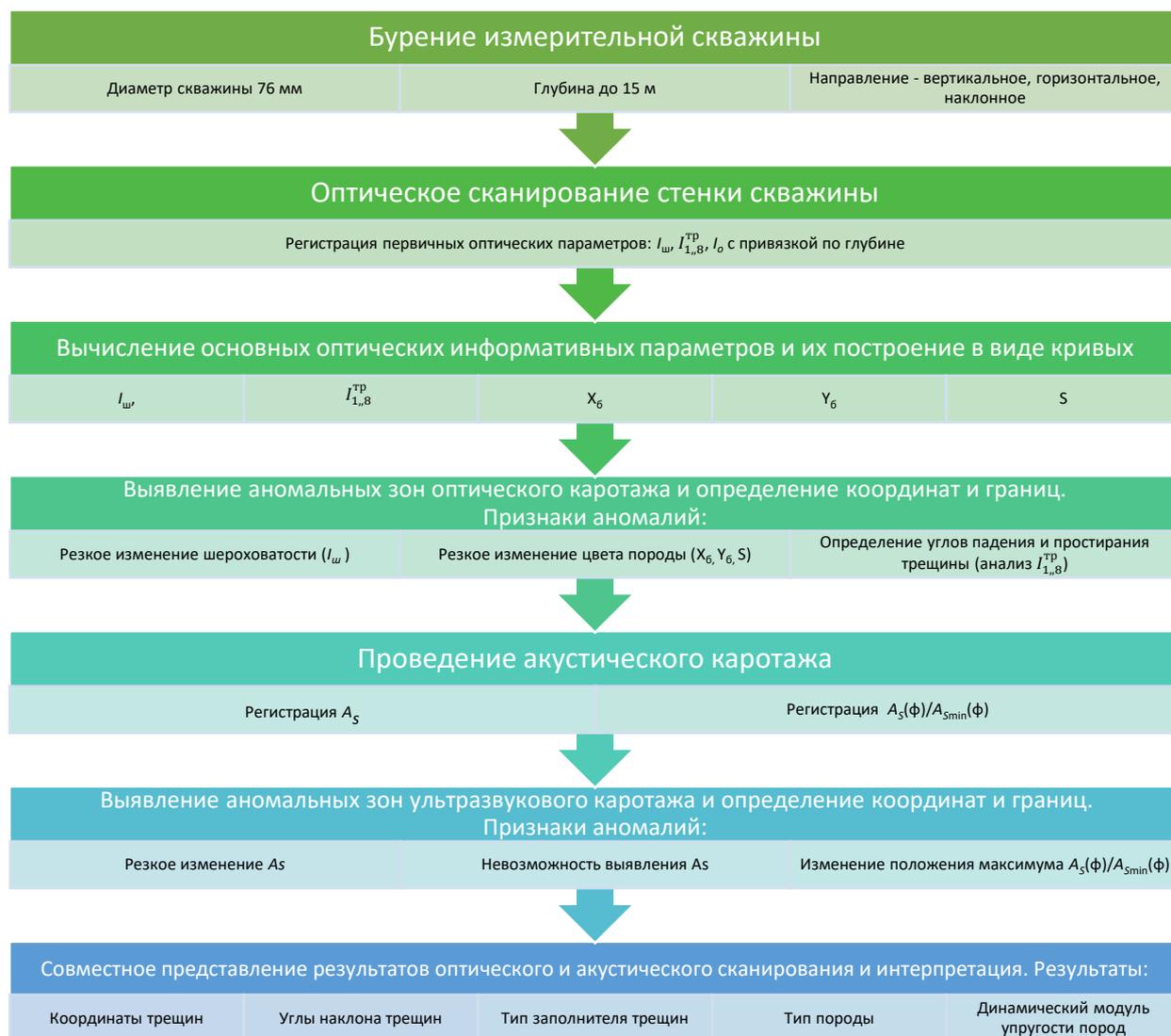


Рисунок 4.5 – Алгоритм проведения комплексного оптико-акустического каротажа скважин

Сокращение количества акустических измерений и общее повышение производительности контроля достигается переходом от 100% ультразвукового каротажа скважины к выборочным измерениям, производимых в аномальных зонах, выявленных по результатам предварительного оптического сканирования. В таблице 4.1 представлены рекомендации по количеству и схеме акустических измерений в зависимости от типа оптической аномалии.

Таблица 4.1 – Рекомендации по проведению ультразвуковых измерений

Вид оптической аномалии	Схема УЗ измерений	Количество измерений и шаг	Результат УЗ измерений
Выявление трещины 8-канальным модулем	Измерение $A_S(\varphi)$ при неизменном положении зонда по глубине ( $z = const$ ).	Шаг измерений – не более $5^\circ$ , количество измерений – не менее 19	Подтверждение наличия и углов трещин. Оценка их заполнения (воздух/порода)
Резкое изменение цвета породы (параметров $X_6$ , $Y_6$ и $S$ )	Измерение $A_S(z)$ при $\varphi = const$ . Измерение $V_p$ и $V_s$	Не менее 3 измерений – в каждой из двух типов пород и на границе	Подтверждение границы пород по вычисленным значениям динамического модуля упругости
Резкое изменение шероховатости (рост $C_v^m$ )	Компенсация шероховатости изменением давления прижима $P$	Дополнительных измерений не требуется.	-

Отдельного обсуждения требует вопрос определения скоростей продольных и поперечных волн. Как отмечалось ранее в п. 3.2, в практике проведения ультразвуковых измерений основной проблемой является выделение времени первого вступления поперечной волны. Для зондов, снабженных обычными поршневыми преобразователями продольных волн, выделение указанного первого вступления производится «на глаз» по изменению амплитуд и иногда выявляемому характерному «слову фаз» (см.

рисунок 3.6).

Разработанный оптико-акустический зонд снабжен преобразователями поперечных волн с изменяемым вектором поляризации. При этом следует понимать, что в любом случае на границе «преобразователь-порода» поперечные волны трансформируются в поперечные и продольные, распространяющиеся породах. При этом для однозначного выделения поперечных волн можно воспользоваться следующим методическим приемом. В одной и той же точке производят два измерения, для первого из которых векторы поляризации S-волн выставляют соосно, а для второго – ортогонально. В последнем случае в зарегистрированной волновой форме поперечные волны полностью пропадают. Выделение поперечных волн таким способом проиллюстрировано рисунком 4.6

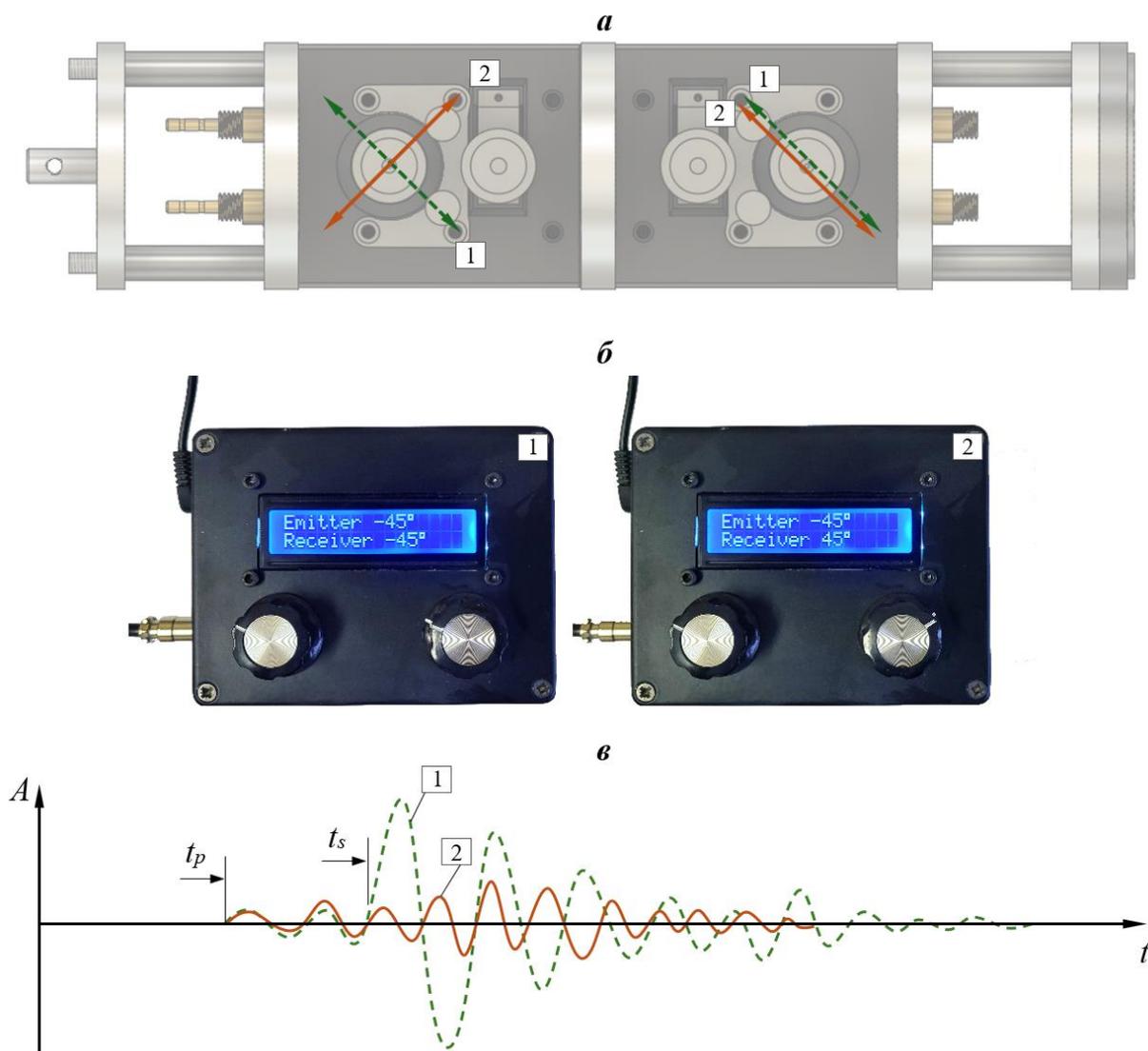


Рисунок 4.6 – Схема взаимного расположения преобразователей (а), соответствующие настройки блока управления сервоприводами (б) и получаемые волновые формы (в) для определения  $t_p$  и  $t_s$ : 1 – совпадающие векторы поляризации  $S$ -волн; 2 – ортогональные векторы поляризации  $S$ -волн

Измеренные по схеме, представленной на рисунке 4.6, значения  $t_p$  и  $t_s$  и известная фиксированная база прозвучивания  $L = 200$  мм позволяют вычислить значения скоростей продольных и поперечных волн. Указанные скорости, в свою очередь, позволяют рассчитать значения динамического модуля упругости  $E_d$  в соответствии с [146]

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  — плотность;  $V_p$  и  $V_s$  — измеренные значения скоростей продольной и сдвиговой волн.

Измеренные значения  $E_d$  в значительной мере характеризуют тип и состоянии породы и могут быть использованы для корректирования технологии крепления горных выработок [147, 148].

#### **Выводы по главе 4**

В ходе работы был разработан макетный образец комплексного оптико-акустического каротажного комплекса, предназначенного для изучения структуры приконтурного массива пород. Комплекс включает ультразвуковой и оптический модули, позволяющие получать детальную информацию о свойствах горных пород. В составе ультразвукового модуля предусмотрены пьезоэлектрические преобразователи поперечных волн с возможностью изменения угла поляризации, а также пневматическая система прижима. Оптический модуль предназначен для оценки шероховатости стенки скважины, выявления трещин и анализа цвета пород, что позволяет значительно повысить эффективность каротажных исследований.

Работоспособность изготовленного оборудования была проверена на физической модели скважины, включающей зоны с различной шероховатостью стенок, а также искусственно созданные трещины с разными параметрами раскрытия и заполнения. В процессе испытаний было подтверждено, что оптический модуль успешно фиксирует изменение шероховатости, а также выявляет трещины по снижению интенсивности отраженного света. Ультразвуковое прозвучивание позволило уточнить параметры трещин и выявить различия в их заполнении: сомкнутые и залеченные трещины приводили к снижению амплитуды поперечной волны, тогда как трещины, заполненные воздухом или водой, не пропускали поперечные волны.

На основе проведенных исследований был сформулирован метод оптико-акустического каротажа, заключающийся в поэтапном проведении измерений в следующем порядке:

- Первоначально выполняется оптическое сканирование, позволяющее быстро выявить зоны повышенной шероховатости, границы между различными типами пород и возможное расположение трещин.
- Затем в выделенных аномальных зонах проводятся акустические измерения, обеспечивающие более точную диагностику трещиноватости, состава заполнителя трещин и механических свойств пород.

Такой подход позволяет значительно повысить производительность каротажных работ за счет сокращения объема трудоемких ультразвуковых измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, решена проблема разработки и обоснования метода контроля строения и состояния приконтурного массива горных пород на основе совместных акустических и оптических измерений в скважинах. Решение указанной проблемы имеет важное значение для науки и практики горного дела, обеспечивая повышение надежности мониторинга и предотвращение катастрофических явлений при подземной добыче полезных ископаемых.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Проведен анализ существующих геофизических методов изучения строения и состояния приконтурного массива горных пород, выявлены их ограничения и перспективные направления развития. Показано, что существующие методы акустического и оптического контроля обладают рядом недостатков, таких как ограниченная достоверность, высокая трудоемкость измерений и сложность интерпретации данных. Во многом устранить указанные недостатки возможно путем комплексного анализа результатов акустических и оптических измерений
2. Сформирована коллекция образцов горных пород, представленная породами различных генотипов и с различными уровнями шероховатости граней.
3. Разработаны и изготовлены электронные модули для измерения оптических характеристик поверхности скважины
4. Разработаны алгоритмы обработки данных, полученных в результате оптических измерений, позволяющие с высокой точностью определять параметры шероховатости поверхности горных пород, а также выявлять и классифицировать трещины, пересекающие измерительную скважину.
5. Экспериментально подтверждено влияние угла между вектором

поляризации сдвиговых волн и плоскостью трещины на динамические характеристики регистрируемых акустических сигналов. Показано, что использование данных параметров позволяет уточнять ориентацию и раскрытие трещин в массиве.

6. Разработаны принципы совместного использования оптических и акустических методов для повышения точности и надежности контроля состояния приконтурного массива. Установлено, что комбинирование данных, полученных методами ультразвукового каротажа и оптического сканирования, позволяет получать более детализированную информацию о трещиноватости массива и параметрах его состояния.
7. Разработано аппаратное обеспечение комплексного оптико-акустического каротажа скважин, обеспечивающее точные и оперативные измерения состояния породного массива вблизи горных выработок. Проведена проверка работоспособности предложенных решений на физической модели скважины, подтвердившая их эффективность.
8. Разработаны методические рекомендации по использованию совместных акустических и оптических измерений для контроля состояния приконтурного массива горных пород. Предложенный метод может быть использован в практике горнодобывающих предприятий для мониторинга устойчивости подземных выработок и своевременного выявления зон повышенной трещиноватости. Рекомендации утверждены в НИТУ МИСИС в виде «Методики структурной диагностики пород вблизи горных выработок с использованием комплексного оптико-акустического каротажа». Её применение позволяет повысить достоверность прогноза устойчивости выработок при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

Полученные результаты обладают высокой научной новизной и практической значимостью, поскольку позволяют существенно повысить надежность контроля состояния горных пород и предотвратить возникновение аварийных ситуаций. Разработанный метод комплексного каротажа открывает

новые перспективы для дальнейшего развития геофизических методов изучения горных пород и их внедрения в промышленную практику.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Цыганков Д.А. Профилактика аварийности как следствия горных ударов в рудных и угольных шахтах // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 3-1. – С. 99-104
- 2 Ломтадзе В.Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1986. – 272 с.
- 3 Дрибан В.А. Устойчивость горных выработок в структурно-неоднородных массивах / В.А. Дрибан // ГИАБ. - 2008. - №9. - С. 305 – 312.
- 4 Цыганков Дмитрий Анатольевич Анализ аварийности горных работ при подземной добыче угля // ГИАБ. 2016. №3. – С. 358-365
- 5 Rumbaugh G., Mark C., Kosteckı T. Massive Pillar Collapses in U.S. Underground Limestone Mines: 2015-2021. (2022). P. 1-12
- 6 Mark C., & Rumbaugh G. International Experience with Airblasts and its Relevance to Underground Stone Mines. (2022). P. 1-18
- 7 Wolfgang A., Christiane F. The Mechanism of Mine-collapse Deduced from Seismic Observations // July 1996. Pure and Applied Geophysics 147(2):207-216
- 8 Tomilin N. G., Voinov K. A. Technique and results of the rock burst prediction, Proceedings of the International Conference on Mechanics of jointed and faulted rock, Rotterdam: Balkema, 1995.
- 9 Герман В. И., Мансуров В. А. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении // ГИАБ. — 2010. — № 1.
- 10 Сборные железобетонные крепи в горизонтальных горных выработках. Цай Т. Н., Чурсин Б. Н., Музыкантов С. П. Ерофеев Л. М. Цай Т. Н., Чурсин Б. Н., Музыкантов С. П. Ерофеев Л. М. М., изд-во «Недра». 1971, стр. 120
- 11 Шуплик Михаил Николаевич. Специальные способы строительства подземных сооружений. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), №. 1, 2013, - С. 595-625.
- 12 Marencė M 2003 Geotechnical design of underground structures. Underground Construction. (2003), pp. 563-572

- 13 Ren, Y., Zhou, S., Jia, J., Yuan, Q., Liu, M., Song, S., Zhou, Z., & Wang, Z. (2023). The Influence of Construction Methods on the Stability of Tunnels and Ground Structures in the Construction of Urban Intersection Tunnels. *Sustainability*, 15(20), 14720. <https://doi.org/10.3390/su152014720>
- 14 Идрис М.А., Нордлунд Э. Вероятностная методика проектирования очистных забоев для сложных рудных тел с изменяющимися свойствами породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2019, №5, - С. 56-62
- 15 Li, Q. Blasting Vibration Safety Criterion Analysis with Equivalent Elastic Boundary: Based on Accurate Loading Model / Q. Li, L. Qiao, G. Dasgupta, S. Ma, L. Wang, J. Dong // *Shock and Vibration*. – 2015. – Article ID 604683. – 10p.
- 16 Нюхина Н.С., Мазур Е.В., Ибрагимова А.А. Обзор программных комплексов для расчета и проектирования мостовых сооружений // Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / *Russian Journal of Transport Engineering*, 2024, Том 11, № 2, - С. 1-30
- 17 Тхориков А. И., Тулин П. К., Третенков И. В. Сравнительный анализ методик оценки сейсмостойкости конструкций крепи подземного сооружения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 9-1. – С. 270–287. DOI:10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_270
- 18 Мамонтов А. О. Потенциальные риски в практике геотехнического моделирования строительных объектов в период действия международных санкций / А. О. Мамонтов, В. В. Полити // *Отходы и ресурсы*. — 2023. —Т. 10. — No 1. — URL: <https://resources.today/PDF/29ECOR123.pdf> DOI: 10.15862/29ECOR123
- 19 Bikova N.M., Zainagabdinov D.A., Baranov T.M. Stresses in the concrete lining of tunnels located in heterogeneous mountain massifs. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; 9(3). Available at: <https://t-s.today/PDF/07SATS322.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/07SATS322

- 20 Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия - к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч.1 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 3-27.
- 21 Сахаров В.И. Фотоупругие датчики деформаций при обследовании конструкций и сооружений /В.И. Сахаров, А.С. Исайкин, А.Н. Моргунов, А.В. Старчевский // Экспериментальная механика.(Хесинские чтения) / М.: Изд-во МГСУ, 2001. — С. 115–123.
- 22 Быкова, Н.М. Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне северо-муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков / Н.М. Быкова, А.С. Исайкин, А.Н. Моргунов, Д.А. Зайнагабдинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2007 —№ 1. — С. 69–74.
- 23 Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения: /метод реком./ Сост.: О.Г. Елифанцев, Н.С. Плетенчук; СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 41с.
- 24 Турсбеков С.В. Геометрическая классификация трещин горных пород // Вестник КазНУ. Серия географическая №1 (36) 2013, - С. 94-97
- 25 Gudmundsson A. Rock Fractures in Geological Processes. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.
- 26 Bles, J L and Fuega, B. "The fracture of rocks." , Jan. 1986.
- 27 Жуков, Е. М. Классификация трещин и расслоений пород кровли по степени опасности с точки зрения возможности обрушения кровли в горных выработках / Е. М. Жуков, Ю. И. Кропотов, И. А. Лугинин, С. И. Полошков. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 2 (106). — С. 142-146.
- 28 Мишин С.В. Горные сооружения и сейсмическая активность // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 2 – С. 76-82
- 29 Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. – М.: ИДГРАН, 2015. 364 с.

- 30 Stathis S., Kontogianni, V.. (2009). Coulomb stress changes: From earthquakes to underground excavation failures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences - INT J ROCK MECH MINING SCI.* 46. 182-187. 10.1016/j.ijrmms.2008.09.013.
- 31 Методика визуальных наблюдений в подземных горных выработках на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам / А. В. Пантелеев, Э. В. Каспарьян, И. Э. Семенова; под ред. А. А. Козырева. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — 68 с.: ил. + Прил.
- 32 Скоробогатько М. Р., Батугин А. С., Беляев Е. Н. Картирование трещиноватости бортов карьера с использованием возможностей нейронных сетей // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2024. – № 11. – С. 75–87. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_75.
- 33 Janiszewski, M, Uotinen, L, Baghbanan, A & Rinne, M 2020, Digitisation of hard rock tunnel for remote fracture mapping and virtual training environment // *ISRM International Symposium - EUROCK 2020 : International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Norwegian Group for Rock Mechanics.* Norsk Betongforening, ISRM International Symposium, Trondheim, Norway, 14/06/2020
- 34 Slob, S., Hack, H.R.G.K., Feng, Q., Roshoff, K., and A.K. Turner. Fracture Mapping Using 3D Laser Scanning Techniques // *11th ISRM Congress, Lisbon, Portugal, July 2007.*
- 35 Вознесенский А.С., Дручинин С.В., Изюмов С.В. Теория и методы георадиолокации. Учебное пособие. Издательство Московского государственного горного университета, Москва, 2008 г., 196 стр.
- 36 Annan, A.P. 2003. *Ground Penetrating Radar, Principles, Procedures & Applications.* Sensors & Software, Inc., Mississauga, Canada, 286p.
- 37 Ковин, О.Н. Особенности методики проведения измерений методом георадар в калийных рудниках ВКМКС / О.Н.Ковин // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. – Пермь, 2004. – С.95-98.*

- 38 Lane, J.W. Evaluation of groundpenetrating radar to detect free-phase hydrocarbons in fractured rocks — results of numerical modeling and physical experiments / J.W.Lane, M.L.Buursink, F.P.Haeni, R.G.Versteeg // *Ground Water*, 2000. – № 38. – P. 929–938.
- 39 Lombardi F, Lualdi M. Multi-Azimuth Ground Penetrating Radar Surveys to Improve the Imaging of Complex Fractures. *Geosciences*. 2018; 8(11):425. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110425>
- 40 Вознесенский А.С. Определение мощности защитного целика в кровле выработок гипсового рудника георадарами / А.С. Вознесенский, В.В. Набатов, Н.П. Пончуков // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2004. - №2. - С. 10-14.
- 41 Андрианов С.В. (2019). Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, (5), 124-132.
- 42 Кавардаков А. А., Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю. Опыт применения георадиолокации в условиях шахты Котинская для оценки состояния подготовительных горных выработок // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, №. 12, 2016, - С. 166-173.
- 43 Dorn, C., N. Linde, T. Le Borgne, O. Bour, and M. Klepikova (2012), Inferring transport characteristics in a fractured rock aquifer by combining single-hole ground-penetrating radar reflection monitoring and tracer test data, *Water Resour. Res.*, 48, W11521, doi:10.1029/2011WR011739.
- 44 Мулёв С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А., and . "Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ)" *Уголь*, №. 10 (1123), 2019, - С. 6-14.
- 45 Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии / Г.Е. Яковицкая. - Новосибирск: Параллель, 2008. - 315 с.

- 46 Беспалько А. А. Физические основы и реализация метода электромагнитной эмиссии для мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород: дисс. докт. наук // Томск, 2019. 395 с.
- 47 Li, Z.; Lei, Y.; Wang, E.; Frid, V.; Li, D.; Liu, X.; Ren, X. Characteristics of Electromagnetic Radiation and the Acoustic Emission Response of Multi-Scale Rock-like Material Failure and Their Application. Foundations 2022, 2, 763-780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>
- 48 Астраханцев Ю.Г., Баженова Е.А., Белоглазова Н.А., Вдовин А.Г., Глухих И.И., Иванченко В.С., Хачай О.А. Комплексные геофизические исследования массивов горных пород в естественном залегании // Екатеринбург, 2018. 105 с.
- 49 Гликман А.Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки. 2002 г., 141 стр.
- 50 Бауков Ю.Н. Физические основы резонансного метода контроля рас-слоенной кровли горных выработок / Ю.Н. Бауков, В.Н. Данилов // Изв. ву-зов. Горный журнал. – 1988. - №1. - С. 12-16.
- 51 Андреев В.П. Геоакустический метод выявления поверхности ослабленного акустического контакта / В.П. Андреев, А.Г. Гликман // Уголь. – 1985. - №12. - С. 19-22.
- 52 Молев М.Д. Геофизическое прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угольных пластов / М.Д. Молев. – Новочеркасск: Изд. ЮРГТУ, 2000. - 138с.
- 53 Гурвич. И.И. Сейсморазведка. — Гос. научно-техн. изд-во лит-ры по геологии и охране недр, 1954-01-01. — 354 с.
- 54 Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 121–136. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136

- 55 Yang, S., Cao, H., Zhang, Y., Chen, L., Xu, X., Song, J. & Xu, L. (2022). Study on observation system of seismic forward prospecting in tunnel: A case on tail-race tunnel of Wudongde hydropower station. *Open Geosciences*, 14(1), 1-12. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0268>
- 56 Liu B, Chen L, Li S, Song J, Xu X, Li M, et al. Three-dimensional seismic ahead-prospecting method and application in TBM tunneling. *J Geotech Geoenviron.* 2017a;143(12):04017090.
- 57 Xinglin Lu, Wei Wang, Chao Yang, Xuquan Hu, Xian Liao, Zhihong Fu; Exploring the Influence of Seismic Source and Improvement Methods on Tunnel Seismic Prediction. *Lithosphere* 2024;; 2024 (2): lithosphere\_2023\_334. doi: [https://doi.org/10.2113/2024/lithosphere\\_2023\\_334](https://doi.org/10.2113/2024/lithosphere_2023_334)
- 58 Ямщиков В.С. Принципы оптимизации акустической локации неоднородностей в массиве / В.С. Ямщиков, В.Н. Данилов, В.Л. Шкуратник // Изв. вузов. горный журнал. – 1984. – №5. - С. 4-7.
- 59 Данилов В.Н. Интроскопия трещиноватого массива методом акустической локации / В.Н. Данилов // Изв. вузов. горный журнал. – 1987. – №1. - С. 1-4.
- 60 Мартынов Геннадий Павлович, Туманов Виктор Владимирович, Грицаенко Антон Юрьевич, and Бородин Дмитрий Сергеевич. Анализ пассивных и активных сейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная» // Труды РАНМИ, №1(3)., 2024, - С. 232-245. doi:10.24412/2519-2418-2024-341-232-245
- 61 Надежка, Л. И. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями воронежского кристаллического массива / Л. И. Надежка, Р. А. Орлов, С. П. Пивоваров, И. Н. Сафронич, М. А. Ефременко // Вестн. Воронеж. ун.-та. Серия: Геология. - Воронеж: ВГУ. - 2003. - № 2 -С. 179-185.
- 62 Анциферов, А. В. Возможности обнаружения трещиноватых газонасыщенных зон на шахтных полях с использованием микросейсм [Текст] / А. В. Анциферов, В. В. Туманов, Л. А. Нов-городцева, В. А. Анциферов, Д. С.

- Бородин // Труды РАНМИИ: сб. науч. тр. - Донецк. - 2023. - № 20-21 (35-36). - С. 101-111.
- 63 Вознесенский А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния геосреды по совместным измерениям акустической и электромагнитной эмиссии / А.С. Вознесенский, Д.В. Тамарин, В.В. Набатов // Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т.1. – М.: ГЕОС, 2007. - С. 358-361.
- 64 Лавров А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород: обзор / А.В. Лавров, В.Л. Шкурятник // Акустический журнал. – 2005. – Т.51, Приложение. – С. 6-18
- 65 Абрамов В.Ю., Бровкин В.И. Основы геофизики и интерпретации геофизических методов.— М.: Изд-во РУДН, 2008. -204 с.
- 66 Зюзин Е.А. Разработка электрометрического метода прогноза параметров пространственной неоднородности кровель пологих угольных пластов: дисс. канд. техн. Наук. Кемерово. 2010. – 129 с.
- 67 Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка. Скважинная электроразведка. Шахтно-рудничная электроразведка. Аэроэлектроразведка. Морская электроразведка. Недра, Ленинград, 1984 г., 534 стр.
- 68 Stanley H. Ward, Resistivity and Induced Polarization Methods // Investigations in Geophysics. (1990). pp. 147-190.
- 69 Yang Y, Zhang G, Yao C, Deng Z, Ren Z, Li C. Application of Induced Polarization Method in Mineral Resource Exploration. Sustainability. 2023; 15(4):3840. <https://doi.org/10.3390/su15043840>
- 70 Revil, A., Karaoulis, M., Srivastava, S., and Byrdina, S., 2013, Thermoelectric self-potential and resistivity data localize the burning front of underground coal fires, Geophysics, v. 78, no. 5, p. 1SO-Z134, doi:10.1190/geo2013-0013.1.
- 71 Wightman, W.E., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K., 2003, Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems: Lakewood, CO, Federal Highway Administration, Office of Bridge Technology, 742 p.

- 72 Дагаев В.Ю. Обоснование и разработка каротажного электроемкостного метода оценки структуры углепородного массива в окрестностях горных выработок: автореферат дис. на соискание. уч. ст. к.т.н. / 25.00.16 - МГГУ. – М.: 2007. - 24 с.
- 73 Шейнин В. И., Мотовилов Э. А., Филиппова С. В. Оценка изменения напряженного состояния грунтов и горных пород по изменению интенсивности потока инфракрасного излучения с их поверхности // ФТПРПИ. — 1994. — № 3.
- 74 Шейнин В. И., Левин Б. В., Мотовилов Э. А., Морозов А. А. Фаворов А. В. Диагностика периодических изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // Физика Земли. — 2001. — № 4.
- 75 Вознесенский А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния геосреды по совместным измерениям акустической и электромагнитной эмиссии / А.С. Вознесенский, Д.В. Тамарин, В.В. Набатов // Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т.1. – М.: ГЕОС, 2007. - С. 358-361.
- 76 Вознесенский А.С. Оценка устойчивости приконтурного массива пород по результатам совместных скважинных измерений параметров акустической и электромагнитной эмиссии / А.С. Вознесенский, В.Л. Шкуратник, В.В. Набатов, Я.О. Куткин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. - №8. - С. 64-70.
- 77 Сайт компании LNDC GEO: офиц. Сайт. – URL: [https://geophysicalinst.com/karotazhnye-pribory/opticheskie-televyuver-imi-dzhery/opticheskij-televyuver-ql40-obi-2g?utm\\_source=chatgpt.com](https://geophysicalinst.com/karotazhnye-pribory/opticheskie-televyuver-imi-dzhery/opticheskij-televyuver-ql40-obi-2g?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения 24.01.2025)
- 78 Сайт компании ТОО "Абсолют Пресижн ЦА": офиц. Сайт. – URL [https://apllimited.com/ru/produkcija/karotajnye-zondy/?utm\\_source=chatgpt.com](https://apllimited.com/ru/produkcija/karotajnye-zondy/?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения 24.01.2025)

- 79 Сайт компании АГТ: офиц. Сайт. – URL <https://agtsys.ru/catalog/product/view/459/123> (дата обращения 24.01.2025)
- 80 Сайт компании ТОО «ГЕОДЕВАЙС КАЗАХСТАН»: офиц. Сайт. – URL [https://geodevice.kz/main/borehole/videokarotazh/hic-200/?utm\\_source=chatgpt.com](https://geodevice.kz/main/borehole/videokarotazh/hic-200/?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения 24.01.2025)
- 81 Сайт компании ООО «Техногео»: офиц. Сайт. – URL <https://tehno-geo.ru/products/priborvideokarotazha> (дата обращения 24.01.2025)
- 82 Шкуратник В.Л. Телевизионный мониторинг скважин на рудниках Кольского полуострова / В.Л. Шкуратник, В.В. Тимофеев, А.А. Ермолин, В.В. Рыбин, К.Н. Константинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. - №2. - С. 76-84
- 83 Berlinghieri, M, Pandolfi, O. Study of the rock masses' fractures through OPTV (Borehole Digital Optical Televiewer) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 833. (2021). №012066. 10.1088/1755-1315/833/1/012066.
- 84 Серый С.С., Кожуховский А.В., and Яницкий Е.Б.. Опыт применения скважинной видеометрии для изучения структуры массива скальных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), №. 4, 2010, - С. 260-267.
- 85 Шкуратник В.Л., Тимофеев В.В., Ермолин А.А., Рыбин В.В., Константинов К.Н. Телевизионный мониторинг скважин на рудниках Кольского полуострова. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), №. 2, 2009, - С. 76-84.
- 86 Li, S.J., Feng, X.T., Wang, C.Y. et al. ISRM Suggested Method for Rock Fractures Observations Using a Borehole Digital Optical Televiewer. Rock Mech Rock Eng 46, 635–644 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0344-9>
- 87 Ямщиков В.С. Введение в геоакустику / В.С. Ямщиков. - М.: МГИ, 1968. – 275 с.
- 88 Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы / В.Л. Шкуратник. – М.: Изд-во МГИ, 1990. - 103 с.

- 89 Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин. Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2014. — 455 с
- 90 Yingjie Li, Bingqian Wang, Lihong Song, Jie Liu, Jianping Zuo, Dejun Liu, Ultrasonic wave propagation characteristics for typical anisotropic failure modes of shale under uniaxial compression and real-time ultrasonic experiments, *Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 17, Issue 2, April 2020, Pages 258–276, <https://doi.org/10.1093/jge/gxz104>
- 91 Николенко П.В., Коссович Е.Л., Шкуратник В.Л., Эпштейн С.А. Физические основы ультразвуковых методов геоконтроля: Учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 78 с.
- 92 Graham A. Winbow. A theoretical study of acoustic S-wave and P-wave velocity logging with conventional and dipole sources in soft formations // *GEOPHYSICS*, 1988, Vol. 53, pp.1334-1342.
- 93 Chen, X., Schmitt, D.R., Kesslerb, J.A., Evans, J., & Kofman, R. (2015). Empirical relations between ultrasonic P-wave velocity , porosity and uniaxial compressive strength // *Canadian Journal of Exploration Geophysics* 40(5) pp. 24 - 29
- 94 Жуков В.С., and Моторыгин В.В. Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности горных пород на скорость продольной волны // *Вести газовой науки*, 3 (35), 2018, - С. 249-255.
- 95 Аверин А.П. Исследование параметров затухания при ультразвуковых наблюдениях // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 10, 2004, - С. 66-70.
- 96 Машинский Э. И. Влияние амплитудного фактора на затухание продольных и поперечных волн в сухом и водонасыщенном песчаниках // *Физическая мезомеханика*, 11(4), 2008, - С. 95-99. doi:10.24411/1683-805X-2008-00056
- 97 Негурица В.П. Исследование и разработка многопараметрового ультразвукового метода и аппаратуры контроля состояния горных пород вблизи выработок: дис. на соиск. уч. степени к.т.н. / 05.15.11.- МГИ.- М. 1970, 184 с.

- 98 Сирота Д.Н. Разработка ультразвуковых способов и средств гео-контроля в условиях помех на горных предприятиях: дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. — МГИ. — М. 1987, 199 с.
- 99 Jones, A. G. and Holliger, K. Spectral analyses of the KTB sonic and density logs using robust nonparametric methods //Journal of Geophysical Research, 1997, vol. 102, no. B8, pp. 18391–18403 doi:10.1029/96JB03668.
- 100 Lizzi FL, Alam SK, Mikaelian S, Lee P, Feleppa EJ. On the statistics of ultrasonic spectral parameters. Ultrasound Med Biol. 2006 Nov;32(11):1671-85. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2006.09.002. PMID: 17112954.
- 101 Кормнов, Алексей Алексеевич. Обоснование и разработка ультразвукового корреляционного метода диагностики структуры и напряжённого состояния массива в окрестностях горных выработок : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.16 / Кормнов Алексей Алексеевич; [Место защиты: Нац. исслед. технол. ун-т]. — Москва, 2018. — 126 с.
- 102 Шкуратник В.Л., Николенко П.В., А.А. Кормнов А.А. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2015. - №3. - С.41-47.
- 103 Кормнов А.А., Николенко П.В. Структурная диагностика пород кровли горной выработки с использованием ультразвукового шумового корреляционного каротажа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2016. - №8. - С. 265 - 271.
- 104 Шкуратник В.Л., Николенко П.В., А.А. Кормнов А.А. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2015. - №3. - С.41-47.
- 105 Шкуратник В.Л., Николенко П.В., А.А. Кормнов А.А. Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании горных пород в условиях одноосного механического нагружения // Горный журнал.- 2016.- №6.- С.60-63

- 106 Гик Л.Д. Методы изучения трещин и пор горных пород на основе данных акустического каротажа // Физическая мезомеханика, 11(4), 2008, - С. 67-73. doi:10.24411/1683-805X-2008-00016
- 107 Che X.H., Qiao, W.X. Acoustic Field in Formation Generated by Linear Phased Array Transmitters in Fluid-Filled Boreholes // Chinese Journal of Geophysics (2004). №47. 10.1002/cjg2.3556.
- 108 Wang H., Toksöz M., Fehler M. Borehole Acoustic Logging – Theory and Methods. (2020). 10.1007/978-3-030-51423-5.
- 109 Шкуратник В.Л. Контактные условия пьезопреобразователей с массивом как помеховый фактор при реализации ультразвуковых методов гео-контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. - №8. С. 33-36
- 110 Чумаков А.А., Николенко П.В., Гупало В.С. Модульный ультразвуковой каротажный комплекс: конструкция и результаты измерений на физической модели скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 3. - С. 119-129.
- 111 Кормнов А.А. Минимизация влияния контактных условий акустических преобразователей с массивом при реализации ультразвукового корреляционного метода контроля / А.А. Кормнов, П.В. Николенко, В.Л. Шкуратник // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2016. СВ №1. – С.43 – 52.
- 112 Сайт компании ООО «Акустические контрольные системы»: офиц. Сайт. – URL <https://acsys.ru/preobrazovatel-s1802-0.05a0d2ps/> (дата обращения 24.01.2025)
- 113 Skuratnik, V.L., Nikolenko, P.V., Anufrenkova, P.S. About features of ultrasonic measurements in coal samples using shear elastic waves // Mining Informational and Analytical Bulletin 2020(4), pp. 117-126
- 114 Seller, D., Edmiston, C., Torres, D. & Goetz, J. 1990. Field performance of a new borehole televiewer tool and associated image processing techniques, paper

- H. In: 31st Annual Logging Symposium Transactions. Society of Professional Well Log Analysts.
- 115 Zemanek, J., Caldwell, R. L., Glenn, E. E., Jr., Holcomb, S. W., Norton, L. J. & Straus, A. J. D. 1968. The Borehole Televiwer- A new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection, SPE-2402. Society of Petroleum Engineers, 43rd Annual meeting preprint. Later published in 1969. Journal of Petroleum Technology, 21(6), 762-774.
- 116 Dudley, J. W., Quantitative fracture identification with the borehole televiwer // 34th Annual Logging Symposium Transactions. Society of Professional Well Log Analysts. 1993.
- 117 Davidson, J. A., Morriss, S. L. & Podio, A. L. 1992. Estimates of formation sound speed from ultrasonic reflections, SPE-24688. In: SPE Annual Technical Conference And Exhibition Proceedings, v. Omega, Formation Evaluation And Reservoir Geology. Society of Petroleum Engineers, 287-298.
- 118 Schlumberger, 1993. Ultrasonic Imaging- USI, Ultrasonic Imager," UBI, Ultrasonic Borehole Imager. Schlumberger Wireline and Testing, Houston, Document No. SMP-9230.
- 119 Barton, C. A., Moos, D., Peska, P. & Zoback, M. D. 1997. Utilizing wellbore image data to determine the complete stress tensor-application to permeability anisotropy and wellbore stability. The Log Analyst, 38(6), pp. 21-33.
- 120 Shirole, D., Hedayat, A., Walton, G. Experimental Relationship Between Compressional Wave Attenuation and Surface Strains in Brittle Rock. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(6), pp. 5770-5793
- 121 Bhattacharjee, S., Deb, D. Optical flow based image analysis for investigating failure mechanism of a rock sample. Rock Dynamics and Applications - State of the Art: Proceedings of the 1st International Conference on Rock Dynamics and Applications, RocDyn-1, 2013, pp. 251-256
- 122 Williams, J.H., and Johnson, C.D., 2004, Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies: Journal of Applied Geophysics, vol. 55, Issue 1-2, p. 151-159.

- 123 Stumm, F., Chu, A., Lange, A.D., Paillet, F.L., Williams, J.H., Lane, J.W., 2001. Use of advanced borehole geophysical techniques to delineate fractured-rock ground-water flow and fractures along water-tunnel facilities in northern Queens County. New York: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4276. 12 pp.
- 124 Wang, J.; Huang, J.; Min, H.; Wang, F.; Wang, Y.; Han, Z. Study on the Weak Interlayer Identification Method Based on Borehole Photo-Acoustic Combined-Measurement: Application to a Landslide Case Study. Appl. Sci. 2022, 12, 10545. <https://doi.org/10.3390/app122010545>
- 125 Николенко П.В., Зайцев М.Г. Перспективы развития ультразвукового метода контроля структуры и состояния массива на основе комплексирования акустических и оптических измерений. Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 25-28 октября 2021 г. – М: ИПКОН РАН, 2021, - С. 128-131.
- 126 Кобилев А.Г. К минералогии Лабинского мышьяково-сурьмяно-никелевого месторождения // Геология на фронте индустриализ, 1936, №9, - С. 11-16.
- 127 Кобылина О.Н. Селенит в гипсоносных толщах Новомосковского месторождения гипса // Вестник ВГУ, серия: Геология, 2011, № 2, с. 66-72.
- 128 Минералы Украины: Краткий справочник / Щербак Н.П. и др. Киев: Наукова думка, 1990. - 408 с.
- 129 Григорьев В. М., Малютин Е. И. Курская магнитная аномалия // Горная энциклопедия. Т. 3 / Под ред. Е. А. Козловского. — М.: Советская энциклопедия, 1987.
- 130 Сайт компании ООО «Глобалгранит»: офиц. Сайт. – URL:<https://globalgranit.ru/ourblog/mansurovskoe-mestorozhdenie-granita> (дата обращения 24.01.2025)
- 131 Иванов М.А. Минералогические признаки и закономерности пространственного распределения разновозрастной трещиноватости в гранитах и

- пегматитах месторождения «Возрождение» («Кавантсаари»), Выборгский массив" // Записки Горного института, 2015, № 212, - С. 21-29.
- 132 Николенко П.В., Зайцев М.Г. Экспериментальное исследование влияния нарушений сплошности на скорости упругих волн в напряженных образцах горных пород с использованием ультразвуковой интерферометрии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 70-79.
- 133 Nikolenko, P.V., Shkuratnik, V.L., Chepur, M.D. Regularities of changes in the velocities of elastic waves in rocks of different porosity under mechanical and thermal loading according to laboratory experiments // Journal of Mining Science, Vol 56(5), 2020, pp. 695-705
- 134 Николенко П. В., Зайцев М. Г., Чепур М. Д. Метод и оборудование для экспресс-контроля трещиноватости приконтурного массива пород на основе оптических измерений в скважинах //Горный журнал», 2022, No 3, С. 8–12 DOI: 0.17580/gzh.2022.03.02.
- 135 Bao J., Yu C. K. W., Wang J., Hu Y., Yao J. -C. Modified inexact Levenberg–Marquardt methods for solving nonlinear least squares problems // Computational Optimization and Applications. 2019. Vol. 74. Iss. 2. P. 547–582.
- 136 Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 403с.
- 137 Гик Л.Д. Методы изучения трещин и пор горных пород на основе данных акустического каротажа // Физическая мезомеханика, 2008, 11(4), pp. 67-73. doi:10.24411/1683-805X-2008-00016
- 138 Al-Obaidi SH, Khalaf FH (2017) Acoustic Logging Methods in Fractured and Porous Formations // J Geol Geophys 6: 293. doi: 10.4172/2381-8719.1000293
- 139 Zhang, Wei & Wu, Tong & Li, Zhipeng & Liu, Shiyuan & Qiu, Ao & Li, Yanjun & Shi, Yibing. (2021). Fracture recognition in ultrasonic logging images via unsupervised segmentation network. Earth Science Informatics. 14. 1-10. 10.1007/s12145-021-00605-6.

- 140 Ольховатенко В. Е. Методы изучения трещиноватости горных пород : учебно-методическое пособие для самостоят. работы по курсу "Инж. геология" / В. Е. Ольховатенко, Г. И. Трофимова, Т. В. Ожогина ; Том. гос. архит.-строит. ун-т. - Томск : Издательство Томского архитектурно-строительного университета, 2015. - 79 с.
- 141 Liu C, Duan M, Huang Y, Huang Q, Liu J, Wang Z, Zhang Z. Research on the Mechanism and Characteristics of Ultrasonically Coupled Mechanical Rock-Breaking Pre-Fracturing Technology. *Machines*. 2023; 11(10):934. <https://doi.org/10.3390/machines11100934>
- 142 Николенко П. В., Зайцев М. Г. Комплексный оптико-акустический каротаж приконтурного массива. Оборудование и физическое моделирование // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 95–106. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_95.
- 143 Николенко П.В., Зайцев М.Г. Метод и оборудование для геофизического мониторинга состояния геосреды на основе совместных оптических и акустических измерений // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать пятая международная конференция, посвященная 300-летию Российской академии наук. Москва, 30 сентября – 2 октября, Борок, 4 октября 2024 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2024, - С. 197-200
- 144 Nikolenko, P.V., Zaitsev, M.G. Method and equipment for the express-control of fracturing in adjacent rock mass by optical borehole logging // *Gornyi Zhurnal*, 2022, Vol. 2022, no. 3, pp. 8–12. DOI: 10.17580/gzh.2022.03.02.
- 145 Николенко П.В., Зайцев М.Г. Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 3. С. 5-15
- 146 Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman RW. *Fundamentals of rock mechanics*, 4th edn., London, Chapman & Hall; 2007: 488p.

- 147 Shen, S.; Gao, Y.; Jia, L. A Comparison of the Relationship between Dynamic and Static Rock Mechanical Parameters // Appl. Sci. 2024, 14, 4487. <https://doi.org/10.3390/app14114487>
- 148 Галунин А. А., Гапеев А. А., Поспичал В. Оценка зависимости динамических модулей упругости от пористости образцов известняка методом импульсной диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 98—107. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_98.

## **Приложение А.**

**Методика структурной диагностики массива пород вблизи горных выработок с использованием комплексного оптико-акустического каротажа**

**Утверждаю:**

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС,

д.т.н., проф. Филонов М.Р.



  
«26» февраля 2025 г.

**МЕТОДИКА СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ МАССИВА ПОРОД  
В БЛИЗИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОМПЛЕКСНОГО ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА**

**Автор:**

Аспирант каф. ФизГео НИТУ МИСИС

 М.Г. Зайцев

Методика рассмотрена и одобрена  
на заседании кафедры ФизГео НИТУ МИСИС

Протокол № 7 от 26.02 2025 г.

 д.ф.-м.н. В.А. Винников

«26» 02. 2025 г.

Москва, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

1.	Область применения.....	127
2.	Нормативные ссылки.....	127
3.	Термины и определения .....	127
4.	Сущность метода .....	128
5.	Требования к аппаратуре .....	130
5.1	Скважинный ультразвуковой каротажный зонд .....	131
5.2	Управляющая и регистрирующая аппаратура.....	133
6.	Проведение измерений .....	135
7.	Обработка результатов измерений и представление результатов .	137

## **1. Область применения**

Настоящие методические рекомендации распространяются на подземные горные выработки (скважины) и регламентируют проведение работ для мониторинга устойчивости подземных выработок и своевременного выявления зон повышенной трещиноватости ультразвуковым методом за счет комплексирования его результатов с результатами оптического анализа поверхности измерительной скважины.

## **2. Нормативные ссылки**

ГОСТ Р 50544-93 Породы горные. Термины и определения.

ГОСТ Р 57719-2017 Горное дело. Выработки. Термины и определения.

ГОСТ Р 58325-2018 Грунты. Полевое описание.

ГОСТ Р 58871-2020 Горное дело. Крезь горных выработок. Термины и определения.

ГОСТ 19527-74 Коронки алмазные для бурения геологоразведочных скважин. Основные размеры.

ГОСТ 2789- 73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

## **3. Термины и определения**

В настоящих рекомендациях использованы термины и определения по ГОСТ Р 50544-93, ГОСТ Р 57719-2017 и ГОСТ Р 58871-2020, ГОСТ 2789- 73, а также следующие термины:

**Оптико-акустический каротаж** - Метод, основанный на сочетании акустических (ультразвуковых) и оптических измерений для анализа состояния приконтурного массива горных пород. Позволяет оценивать трещиноватость, неоднородности и механические характеристики пород.

**АЦП (аналого-цифровой преобразователь)** - Устройство, преобразующее аналоговые сигналы (например, акустические волны) в цифровую форму для обработки на компьютере.

**Сервопривод** - Электромеханическое устройство, управляющее углом поворота ультразвуковых преобразователей для изменения направления вектора поляризации поперечных волн.

**Пневматическая система прижима** – Система, обеспечивающая плотный контакт ультразвуковых преобразователей со стенкой скважины за счет нагнетания воздуха в эластичные камеры.

**База прозвучивания** – Расстояние между излучающим и приемным ультразвуковыми преобразователями.

**Зона разуплотнения** - Участок горного массива с пониженной плотностью и повышенной трещиноватостью, выявляемый с помощью акустических измерений.

**Литологическое расчленение** – Разделение массива пород на слои по их литологическим (минералогическим и структурным) характеристикам.

#### **4. Сущность метода**

Метод оптико-акустического каротажа основан на использовании сочетания акустических и оптических измерений для анализа состояния приконтурного массива горных пород. Физическая основа метода заключается в различной реакции пород на распространение упругих волн и взаимодействие с оптическим излучением, что позволяет получать комплексную информацию о трещиноватости, неоднородностях и механических характеристиках массива.

Акустическая часть метода использует поперечные ультразвуковые волны, распространяющиеся в массиве и взаимодействующие с его структурными элементами. Скорость и амплитуда распространения таких волн зависят от плотности, упругих свойств и наличия трещин в породе. При этом фиксируются отраженные и преломленные сигналы, анализ которых позволяет оценить

внутреннюю структуру массива, выявить зоны разуплотнения, ориентировку трещин и тип их заполнения.

Оптическая часть метода основана на анализе отраженного света, рассеянного на неровностях поверхности скважины и трещинах, пересекающих скважину. Применение массива дискретных оптических датчиков позволяет определять шероховатость породы, выявлять трещины и характеризовать их геометрию. Использование лазерного освещения и методов корреляционной обработки изображений повышает точность определения параметров трещиноватости.

Сущность метода заключается в интеграции данных, полученных акустическими и оптическими измерениями, что обеспечивает комплексную оценку состояния приконтурного массива. Совмещение этих методов позволяет компенсировать ограничения каждого из них: акустический каротаж дает информацию о внутренней структуре, но не позволяет точно оценить геометрические параметры трещин, тогда как оптическое сканирование фиксирует лишь поверхностные параметры, но не проникает вглубь массива.

Метод оптико-акустического каротажа решает несколько ключевых задач:

- определение пространственной ориентации и размеров трещин,
- оценка их заполнения
- выявление зон повышенной трещиноватости и локальных дефектов массива
- литологическое расчленение приконтурного массива
- оперативный контроль состояния пород в условиях подземной добычи полезных ископаемых.

Применение данного метода повышает надежность мониторинга горных пород и способствует раннему выявлению потенциально опасных зон, снижая риски аварийных ситуаций и катастрофических разрушений в подземных выработках.

## 5. Требования к аппаратуре

Реализация оптико-акустического каротажа осуществляется с применением специально разработанного измерительного комплекса, состоящего из скважинного зонда и регистрирующей аппаратуры. Состав каротажного зонда представлен на рисунке 1.

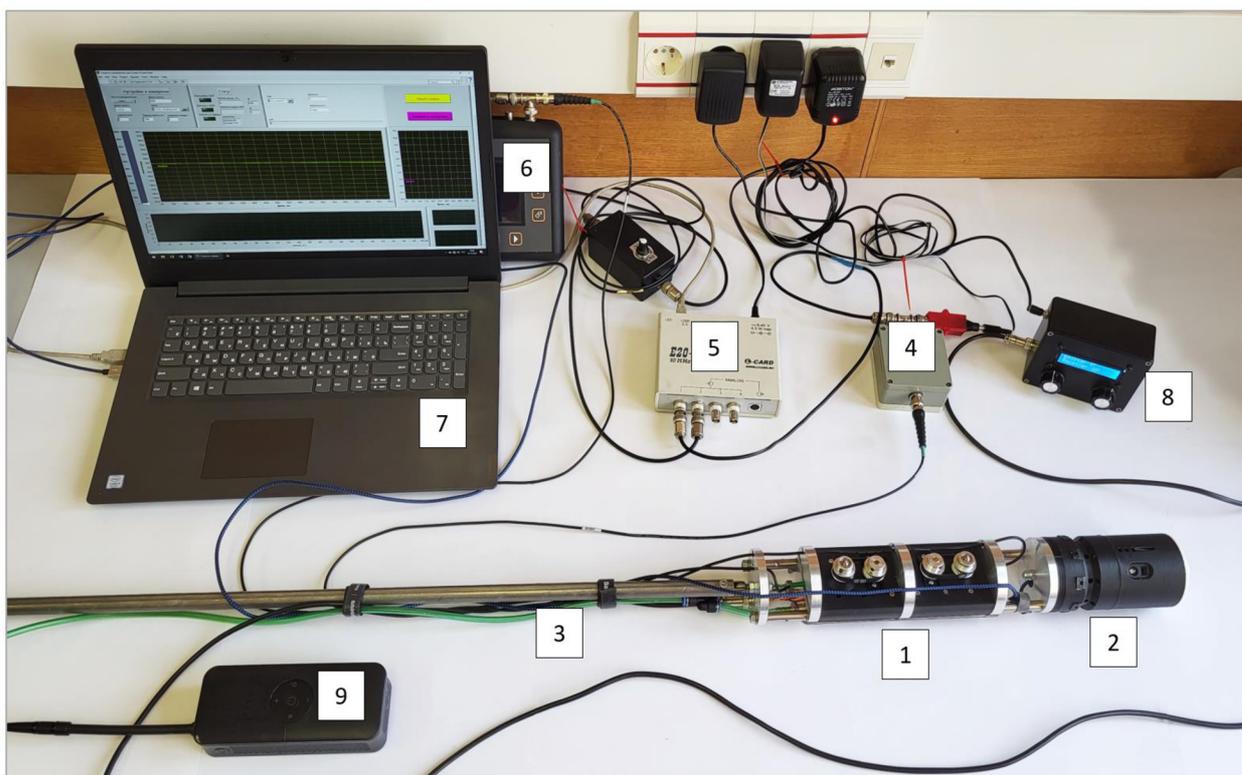


Рисунок 1 – Общий вид оптико-акустического каротажного комплекса: 1 – модуль УЗ прозвучивания; 2 – оптический модуль; 3 – досылочное устройство; 4 – предусилитель; 5 – АЦП; 6 – генератор УЗ импульсов; 7 – персональный компьютер; 8 – блок управления сервоприводами поворота УЗ преобразователей; 9 – пневматический насос системы прижима

Состав комплекса можно условно поделить на два основных элемента – скважинный зонд и управляющая-регистрирующая аппаратура, находящаяся вне скважины.

## 5.1 Сквжинный ультразвуковой каротажный зонд

Основой каротажного комплекса является специально разработанный каротажный зонд, состоящий из модулей ультразвуковых и оптических измерений. УЗ модуль состоит из двух пьезоэлектрических преобразователей поперечных волн S1802 0.05A0D2PS с резонансной частотой 50 кГц, и сервоприводов, позволяющих, вращая преобразователи, изменять угол между вектором поляризации  $S$ -волны и осью скважины. Управление сервоприводами осуществляется с управляющего модуля, связанного с зондом многожильным экранированным кабелем. Прижим преобразователей к стенке скважины осуществляется пневматической системой и насосом с цифровым манометром. База прозвучивания составляет 200 мм. Схема и разрез ультразвукового модуля представлены на рисунке 2.

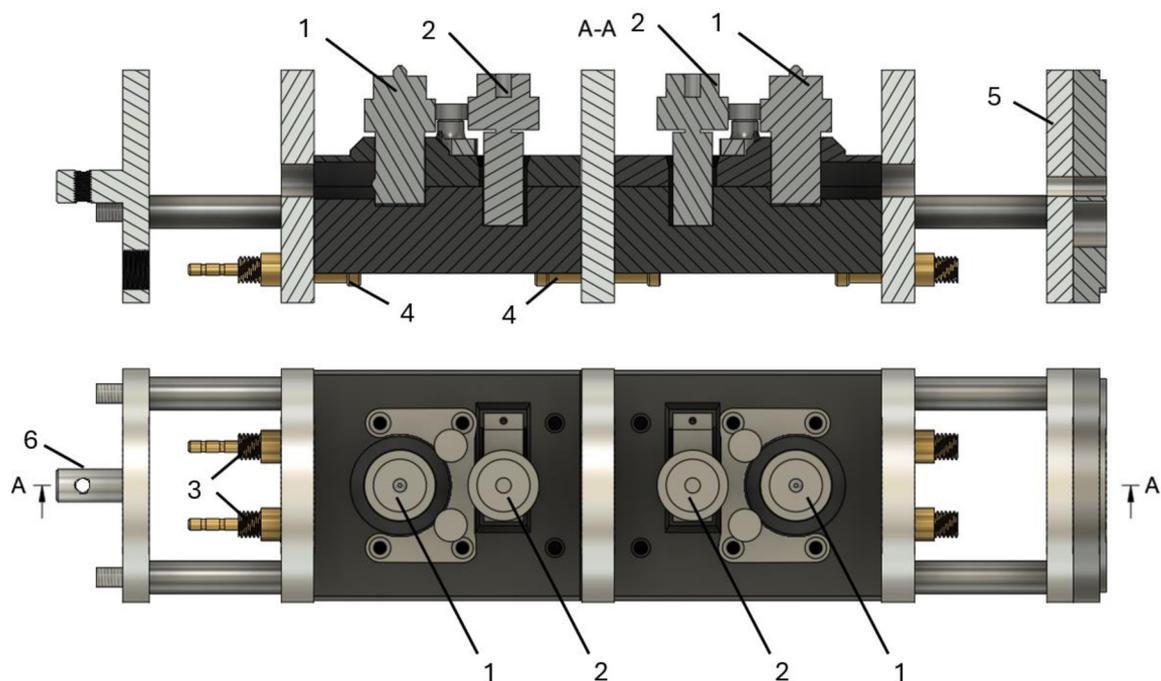


Рисунок 2 – Ультразвуковой модуль: 1 – ультразвуковые преобразователи, 2 – сервоприводы управления направлением вектора поляризации, 3 – штуцеры подключения пневмомагистрали, 4 – штуцеры подключения баллонов пневмоприжима, 5 – планшайба для присоединения оптического модуля, 6 – узел крепления разборных досылочных штанг

Модуль позволяет определять скорости распространения и амплитуды продольных и поперечных волн, а также (в случае записи полных волновых форм) весь набор спектральных параметров. Коммутация модуля с регистрирующей аппаратурой производится с помощью пары высокочастотных коаксиальных кабелей длиной 15 м. Прижим преобразователей реализуется нагнетанием воздуха в эластичные камеры через пневмошланг длиной 15 м с помощью компрессора.

Оптический модуль предназначен для бесконтактного определения степени шероховатости поверхности скважины, а также выявления трещин, пересекающих скважину и оценки их ориентации в пространстве и состоит из трех основных компонентов – устройства определения углов падения и простираения трещин, устройства бесконтактного определения степени шероховатости поверхности скважины и устройства определения цвета горной породы.

Устройство определения углов представляет собой 8-канальный модуль, подключаемый к персональному компьютеру. В качестве источника света использовался светодиод GNL-5053UWC видимого света (от 5500 до 7000 К). В роли фоточувствительного элемента выступает фоторезистор PGM5516, подключенный в качестве делителя напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит. Угол между осью светодиода и поверхностью сканирования составляет  $45^\circ$ .

Устройство бесконтактного определения шероховатости выполнено в виде двухканального блока, подключаемого к персональному компьютеру. В качестве источника света используется лазерный модуль DSP6505-0415 с длиной волны  $\lambda = 650$  нм. В качестве фоточувствительного элемента выступают два фоторезистора PGM5516, подключаемые в качестве составной части делителя напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит. Угол падения лазерного луча к поверхности сканирования  $-10 \div 15^\circ$ .

Устройство определения цвета горной породы представляет собой одноканальный блок, снабженный универсальным RGB светодиодом. Интенсивность света  $I_o$ , отраженного от поверхности, последовательно освещаемой различными цветами: красным ( $\lambda = 625-740$  нм), зеленым ( $\lambda = 550-565$  нм), синим ( $\lambda = 450-480$  нм), голубым ( $\lambda = 480-510$  нм), лиловым ( $\lambda = 380-440$  нм) и желтым ( $\lambda = 565-590$  нм) регистрируется фоторезистором PGM5516, подключенным в качестве делителя напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит.

Связь оптического блока с регистрирующей аппаратурой осуществляется по цифровому кабелю универсальной последовательной шины.

## **5.2 Управляющая и регистрирующая аппаратура**

Управление комплексом осуществляется с персонального компьютера с установленным соответствующим программным обеспечением.

Дискретизация акустических сигналов производится с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) E20-10 производства компании Л-Кард, который представляет собой высокоскоростной внешний модуль ввода-вывода, подключаемый через интерфейс USB 2.0. Основные технические характеристики E20-10 включают:

- **АЦП:** разрядность 14 бит, максимальная частота дискретизации 10 МГц, 4 канала с независимой настройкой поддиапазонов измерения напряжения ( $\pm 3,0$  В;  $\pm 1,0$  В;  $\pm 0,3$  В).
- **Цифровые линии:** 16 входов и 16 выходов, совместимых с логикой TTL.
- **Буферизация данных:** встроенный FIFO-буфер объемом 8 Мбайт для обеспечения непрерывного сбора данных на высоких скоростях.
- **Габариты и масса:** 142 x 132 x 40 мм, масса не более 0,3 кг.

Модуль E20-10 предназначен для построения многоканальных высокоскоростных систем сбора данных, цифрового управления и контроля состояния внешних устройств. Он поддерживает продвинутое режимы

синхронизации, позволяющие создавать многомодульные системы сбора данных по схеме "один задатчик – много приемников". Благодаря полностью загружаемой извне архитектуре (FPGA), пользователи имеют возможность самостоятельно обновлять прошивки до последних версий. Также доступен вариант промышленного исполнения, рассчитанный на работу в расширенном температурном диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Перед оцифровкой сигналов предусиление осуществлялось с помощью предусилителя ПАЭФ-14, обеспечивающего коэффициент усиления 26 дБ при уровне шума, приведённого ко входу в полосе 30–500 кГц, не более 5 мкВ. Он имеет сопротивление нагрузки 50 Ом и обеспечивает неравномерность амплитудно-частотной характеристики в пределах  $+0,5/-3$  дБ, а также поддерживает стандартные частоты среза для сменных фильтров, включая низкочастотные 500 кГц и высокочастотные 25 кГц с крутизной среза 24 дБ на октаву.

Изменение вектора поляризации поперечной волны осуществляется с помощью блока управления сервоприводами. Шаг поворота для излучателя и приемника -  $5^{\circ}$ , питание 5 В.

Схема коммутации компонентов каротажного комплекса приведена на рисунке 3.

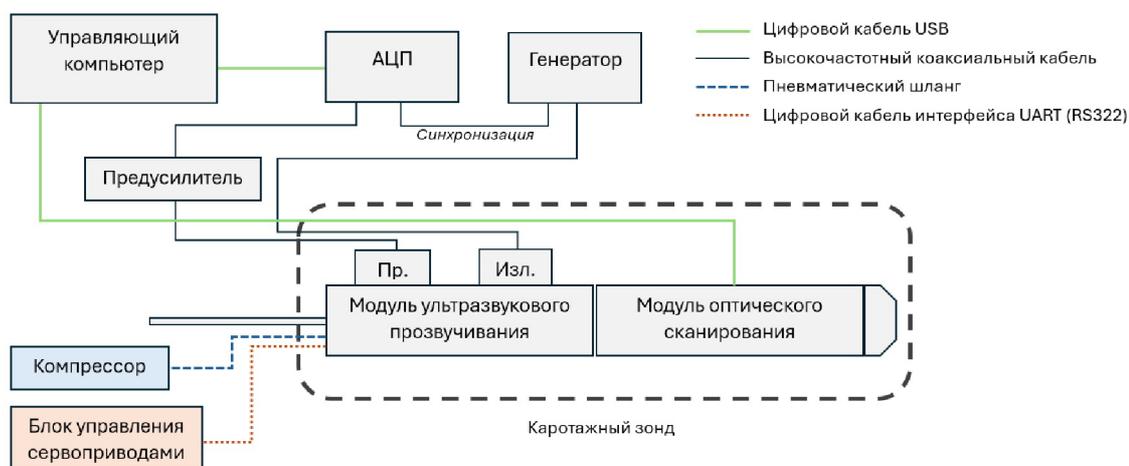


Рисунок 3 – Схема коммутации элементов каротажного комплекса

## 6. Проведение измерений

- 6.1 Подготовительные операции заключаются в бурении вертикальной скважины  $d = 76$  мм в кровле горной выработки буровым инструментом в соответствии с ГОСТ 19527-74 на глубину, превышающую мощность непосредственной кровли или глубину расположения максимума зоны опорного давления.
- 6.2 В полевых условиях собирают ультразвуковой каротажный комплекс по схеме, показанной на рисунке 3 и производят проверку его работоспособности.
- 6.3 Оптические измерения проводятся в следующей последовательности:
  - 6.3.1 Зонд размещают в забое подготовленной скважины. Точную глубину расположения зонда и номер (идентификатор) скважины фиксируют в журнале наблюдений.
  - 6.3.2 Перемещение зонда осуществляют дискретно от забой к устью производя оптическое сканирование. Глубину фиксируют по отметкам на досылочных штангах.
  - 6.3.3 По результатам оптического сканирования выделяют аномальные области, свойства которых необходимо дополнительно уточнять с применением более чувствительных, но и более трудоемких акустических измерений на основе рекомендаций из таблицы 1.

Таблица 1 – Рекомендации по проведению ультразвуковых измерений

Вид оптической аномалии	Схема УЗ измерений	Количество измерений и шаг	Результат УЗ измерений
Выявление трещины 8-канальным модулем	Измерение $A_S(\varphi)$ при неизменном положении зонда по глубине ( $z = const$ ).	Шаг измерений – не более $5^\circ$ , количество измерений – не менее 19	Подтверждение наличия и углов трещин. Оценка их заполнения (воздух/порода)
Резкое изменение цвета породы (параметров $X_6$ , $Y_6$ и $S$ )	Измерение $A_S(z)$ при $\varphi = const$ . Измерение $V_p$ и $V_s$	Не менее 3 измерений – в каждой из двух типов пород и на границе	Подтверждение границы пород по вычисленным значениям динамического модуля упругости
Резкое изменение шероховатости (рост $C_v^{uu}$ )	Компенсация шероховатости изменением давления прижима $P$	Дополнительных измерений не требуется.	-

6.4 Зонд повторно размещают в забое скважины и производят акустические измерения в выделенных аномальных зонах.

6.4.1 С помощью устройства пневматического прижима обеспечивают надежный контакт акустических преобразователей с массивом пород.

6.4.2 Производят регистрацию волновых форм сигналов, распространяющихся от излучающего преобразователя к приёмному преобразователю, и сохраняют полученные записи в отдельные файлы.

6.4.3 При необходимости измерения в одной точке производят при различных направлениях вектора поляризации поперечных волн (см. таблицу 1).

6.5 Повторяют операции, описанные в п. 6.2 для всех пробуренных скважин

На рисунке 4 схематично представлен алгоритм проведения комплексного оптико-акустического каротажа приконтурного массива.



Рисунок 4 – Алгоритм проведения комплексного оптико-акустического каротажа скважин

## 7. Обработка результатов измерений и представление результатов

Результатами оптических измерений являются распределения значений интенсивности отраженного света в функции от глубины расположения зонда. Для определения углов падения и протирания трещины первичным является нахождение координат минимальных значений  $I_i^{\min}$ , соответствующих прохождению  $i$ -ого фоточувствительного элемента над трещиной. Задача определения углов  $\alpha$  и  $\beta$  в этом случае сводится к аппроксимации указанных точек функцией

$$z = a_0 + a_1 \cos(a_2 x + a_3), \quad (1)$$

и последующим нахождением  $\alpha$  и  $\beta$  из

$$\alpha = \frac{180 \cdot \operatorname{arctg} \frac{2a_1}{d_{\text{СК}}}}{\pi}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{a_3 \cdot 180}{\pi} - 90, \quad (3)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  – коэффициенты регрессии (в данном случае  $a_1 = A$ ,  $a_3 = \varphi$ ).

Аппроксимация данных должна производиться методом взвешенных наименьших квадратов (ВМНК), в соответствии с выражением

$$\sum_{i=1}^n W_i (z_i - z_i^*)^2 = \min, \quad (4)$$

где  $z_i$  и  $z_i^*$  – измеренная и предсказанная аппроксимацией  $z$  координата точки  $i$ -ым фоточувствительным элементом,  $W_i$  – матрица весовых коэффициентов. В данном случае используется прямое назначение весов (т.н. direct weighting). В этом случае значения  $W_i$  получают путем анализа ширины пика графиков  $I_i(z)$  из

$$W_i = \frac{1}{\Delta I_i}, \quad (5)$$

где  $\Delta I_i$  – количество соседних точек нормированной зависимости  $I_i(z)$ , имеющих значение 0.

Для определения степени шероховатости определяется коэффициент вариации зарегистрированной интенсивности отраженного света  $I_P$

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение  $I_P$ ,  $\mu$  – математическое ожидание  $I_P$ .

Пересчет значений  $C_v$  в шероховатости  $R_a$  производят в соответствии с тарифовочной зависимостью, приведенной на рисунке 5.

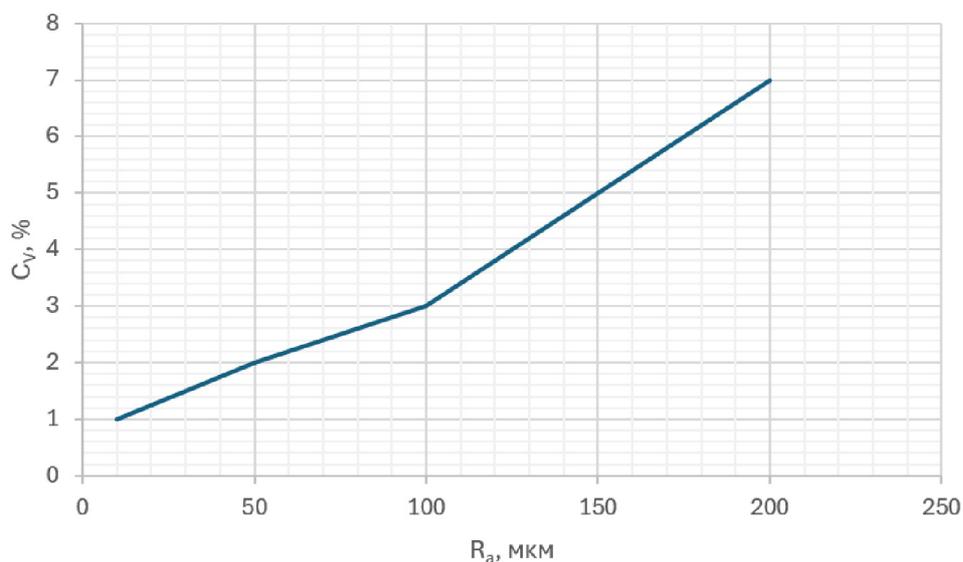


Рисунок 5 – Тарифовочная зависимость  $C_v(R_a)$

Определение цвета породы производится путем расчета координат  $X_6$  и  $Y_6$  центров масс (барицентров) шестиугольников, ограниченных полярными диаграммами измеренных значений  $I_o$  отраженного света на различных длинах волн

$$X_6 = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (7)$$

$$Y_6 = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (8)$$

где  $n$  – количество вершин многоугольника ( $n = 6$ ),  $A$  – площадь многоугольника, определяемая из выражения

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i|, \quad (9)$$

Соответствие конкретной породы вычисленным значениям  $X_6$  и  $Y_6$  производится по результатам предварительных измерений на образцах.

Обработка результатов ультразвуковых измерений основывается на определении амплитуд зарегистрированных поперечных волн. Поскольку для излучения и приема используются преобразователи поперечных волн, то выделение таких амплитуд не представляет особой сложности и может быть оценено по максимальному значению амплитуд в волновой форме. Результат измерений представляется в виде полярной диаграммы (для конкретной глубины в скважине), пример которой приведен на рисунке 6.

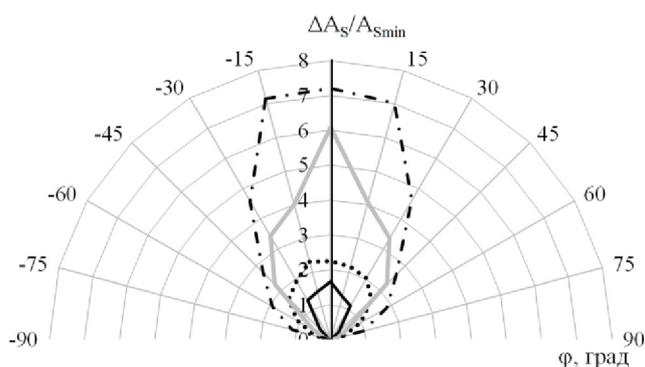


Рисунок 6 – Пример получаемой зависимости  $A_S(\varphi)/A_{Smin}(\varphi)$

Общим результатом комплексного оптико-акустического каротажа является набор каротажных диаграмм, по которым делается вывод о строении и состоянии приконтурного массива пород. Пример интерпретированной диаграммы приведен на рисунке 7.

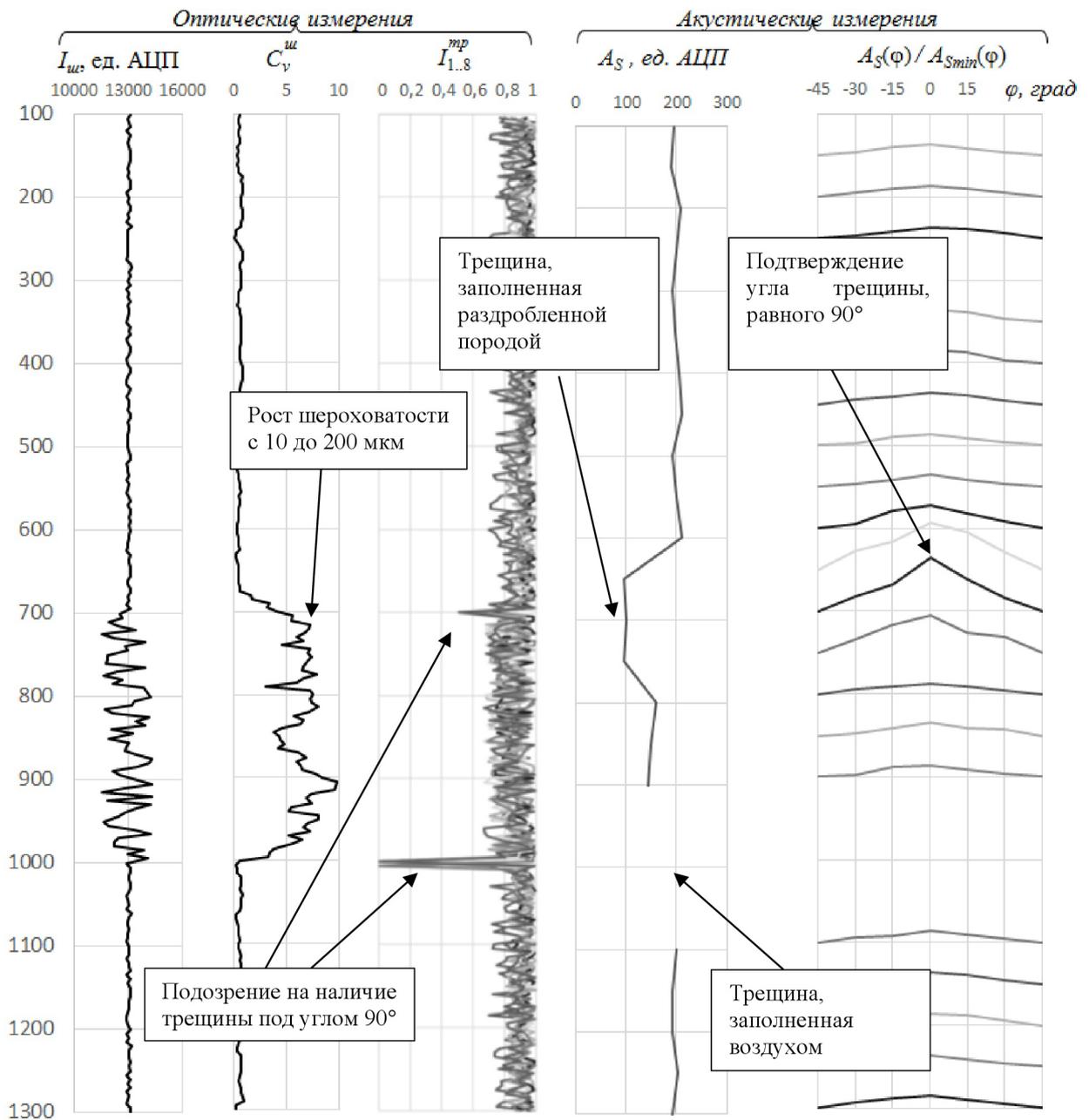


Рисунок 7 – Пример интерпретированной каротажной диаграммы

## **Приложение Б.**

**Информация о практическом использовании результатов исследования**



Общество с ограниченной ответственностью  
«Газпром геотехнологии»  
(ООО «Газпром геотехнологии»)

3-я лин. В.О., д. 62, литера А, помещ. 25-Н,  
вн.тер.г. муниципальный округ Васильевский,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199178  
тел.: +7 (812) 613-09-40, факс: +7 (812) 613-09-40  
e-mail: mail@gazpromgeotech.ru, www.geotech.gazprom.ru  
ОКПО 11523652, ОГРН 1037739149447, ИНН 7719002546, КПП 780101001

11.03.2025 № 01/13-321

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы  
Зайцева Михаила Геннадьевича, представленной на соискание ученой  
степени кандидата технических наук, на тему:  
«Обоснование и разработка метода контроля строения и состояния  
приконтурного массива горных пород на основе совместных акустических и  
оптических измерений в скважинах»

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методика структурной диагностики массива пород вблизи горных выработок с использованием комплексного оптико-акустического каротажа», разработанные в рамках диссертационной работы «Обоснование и разработка метода контроля строения и состояния приконтурного массива горных пород на основе совместных акустических и оптических измерений в скважинах», выполненной в Горном Институте НИТУ «МИСИС», принята Обществом к применению при проектировании и создании подземных шахтных хранилищ.

И.о. первого заместителя  
генерального директора –  
главного инженера



Скворцов А.А.