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

Зайцев Михаил Геннадьевич

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

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Доктор технических наук
Николенко Петр Владимирович

Москва – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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) весьма важной становится задача 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 акустических параметров и типов 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 значительного разброса свойств пород. Кроме того, акустические исследования, как правило, производят на максимально однородных образцах, что неизбежно приводит к необходимости учета масштабного эффекта 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 невысокой производительностью.

Использование видео каротажа позволяет получать оперативную информацию о 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 некоторые 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 нет. Это подтверждается отсутствием подобных исследований как в нашей стране, так и за рубежом.

Настоящая работа выполнялась при финансовой поддержке РНФ (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.

Задачи диссертационного исследования:

1. Произвести анализ современного опыта инструментального исследования строения и состояния приконтурного массива пород.
2. Сформировать коллекцию образцов горных пород, обладающих различными акустическим 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 аппаратурное 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

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.

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.

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.

Научная новизна работы заключается в:

- обосновании оптимальных параметров оптического сканирования для определения наличия и геометрических параметров трещин, пересекающих измерительную скважину;
- обосновании технических и информативных параметров оптического сканирования горной породы, позволяющих определять степень шероховатости ее поверхности;
- установлении влияния шероховатости поверхности породы на параметры ультразвуковых сигналов, а также обосновании способов его снижения за счет управления давлением прижима;
- установлении влияния угла между плоскостью трещины и вектором поляризации поперечных волн на их динамические параметры;
- обосновании принципов совместного использования оптических и акустических методов с целью повышения надежности и оперативности оценки структуры и состояния приконтурного массива пород.

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 146 источников, содержит 44 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируется современное состояние проблемы контроля строения и состояния приконтурного массива горных пород, а также роль, которую играют в её решении оптические и акустические методы. Отмечена роль в становлении и развитии этих методов таких отечественных учёных, как Ватолин Е.С., Глушко В.Т., Данилов В.Н., Козырев А.А., Кузнецов О.Л., Мамбетов Ш.А., Носов В.Н., Шкуратник В.Л., Яковлев Д.В., Ямщиков В.С. и др., зарубежных ученых Liu, Y., Li, Y., Qiao, L., Fan, D., Sun, H., Belhaj, H., Tao, G., Vega, S., Liu, L. и др.

В главе представлен анализ современного состояния инструментальных методов оценки структуры и состояния приконтурного массива пород. Показано, что наибольшее развитие получили методы акустического и оптического каротажа измерительных скважин. Проанализированы достоинства указанных методов, заключающиеся в возможности определения наличия и координат трещин, пересекающих измерительную скважину. Вместе с этим выявлен ряд недостатков, существенно ограничивающих широкое их применении, среди которых: высокая трудоемкость проведения измерений, относительно низкая чувствительность кинематических информативных параметров ультразвукового каротажа при выявлении трещин, высокая степень субъективности интерпретации результатов оптического каротажа. Показано, что расширение возможностей обоих методов возможно за счет их комплексирования, для чего потребуется

проведение дополнительных исследований, а также создание специализированного аппаратурного и методического обеспечения.

Вторая глава посвящена определению свойств горных пород на основе дискретных оптических измерений на образцах пород, для чего создана коллекция образцов следующих горных пород: 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 имели форму параллелепипедов со сторонами 40×40×80 мм. Общий вид полученных образцов представлен на рисунке 1.

На каждой из боковых граней образцов была нанесена фактурная поверхность, эмитирующая различные типы обработки стенки скважины. Шероховатость поверхности определялась через параметр R_a, который представляет собой среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины. Для четырех граней образцов значения шероховатости составляли R_a = 10, 50, 100 и 200 мкм.

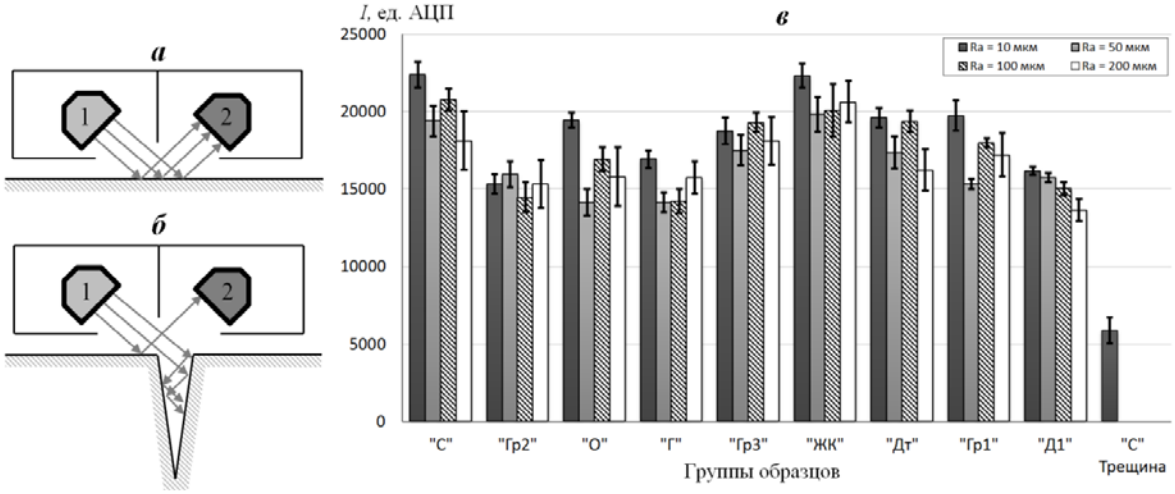
Рисунок 1 – Образцы горных пород различных генотипов

Одним из важнейших факторов, влияющих на устойчивость конструктивных элементов систем разработки, является наличие и ориентация трещин. Выявление трещин и определение их геометрических параметров на сегодняшний день производится с применением каротажных исследований, включающих ультразвуковой и оптический каротаж. При этом оба этих метода обладают рядом существенных недостатков. Для первого характерна низкая производительность контроля в необводненных скважинах, для второго – сложность обработки фотофиксации поверхности скважины и субъективность выводов, которая в значительной степени может зависеть от квалификации оператора. Снизить влияние описанных недостатков возможно при замене фотофиксации стенок скважины дискретными измерениями в локальных областях с помощью фоточувствительных элементов. Подобных подход предполагает получение результатов измерений в виде каротажных кривых зависимости интенсивности отраженного света I от координаты вдоль оси скважины z. В таком виде данные о наличие и ориентации трещин в породном массиве могут быть легко интерпретированы как отдельно, так и совместно с УЗ и другими каротажными измерениями.

Принцип оптического определения наличия трещин основан на измерении интенсивности отраженного от поверхности скважины света и иллюстрируется рисунком 2. Очевидно, что в этом случае на величину I также будут влиять отражающие свойства поверхности, такие как степень ее шероховатости, а также цвет породы, определяемый ее генотипом. Вторым этапом экспериментальных

исследований заключался в оценке помехового влияния указанных свойств породы на интенсивность отраженного светового потока.

Измерения производились специально сконструированным электронным модулем, подключаемым к персональному компьютеру. В качестве излучателя света использовался светодиод GNL-5053UWC видимого света (от 5500 до 7000 K). В качестве 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°. Для каждого образца и типа поверхности были определены значения интенсивности отраженного света *I* на основе статистического анализа 30 измерений на каждой грани. Результаты приведены на рисунке 2в. Также для сравнения на рисунке 2в приведено значение *I* для случая прохождения фоточувствительного датчика над трещиной с раскрытием 1 мм.



1 – источник света, 2 – фоточувствительный элемент; планками на гистограмме показано СКО

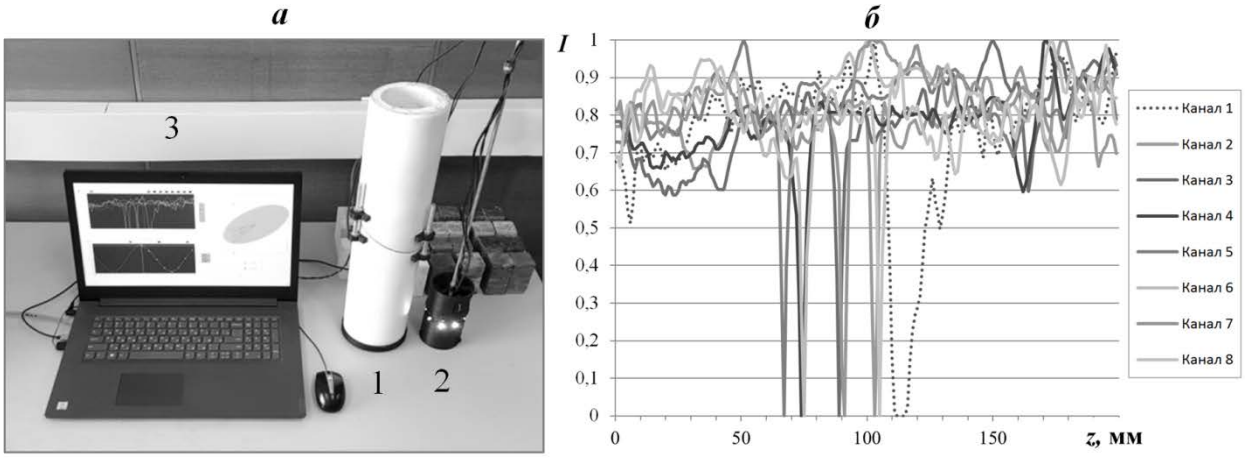
Рисунок 2 – Схема оптического сканирования ровной поверхности (а), поверхности с трещиной (б) и результаты экспериментального определения $I(R_a)$ на различных образцах горных пород (в)

Из диаграммы на рисунке 2в видно, что наименьшие значения *I* соответствует поверхностям образцов с наибольшей шероховатостью, что, очевидно, связано с высокой степенью рассеяния света на неровностях. Генотип породы, определяющий цвет ее поверхности, также оказывает влияние на значения *I*, которое изменяется в пределах 30 %. При этом прохождение фоточувствительного элемента над трещиной приводит к значительно большему изменению значений *I* (падение составляет более на 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.

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 под углом 30° с изменяемой шириной раскрытия, имитирующая трещину. Оптическое сканирование стенок скважины производилось с помощью изготовленного 8-канального зонда, подключаемого к персональному компьютеру. В указанном зонде фоточувствительные элементы располагались равномерно по окружности с шагом 45°. Сканирование производилось вдоль вертикальной оси z с шагом 1 мм.

Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 3а, а пример результатов сканирования скважины для трещины с раскрытием 1 мм в виде нормированных зависимостей $I(z)$ – на рисунке 3б.



1– модель скважины; 2 – оптический зонд, 3 – ПК

Рисунок 3 – Лабораторный стенд (а) и результаты оптического сканирования (б)

В задачу исследования входило определение ориентации трещины при разных величинах ее раскрытия. Ориентация трещин определяется двумя углами: углом падения (наклона) α и углом простирания β и иллюстрируется рисунком 4а.

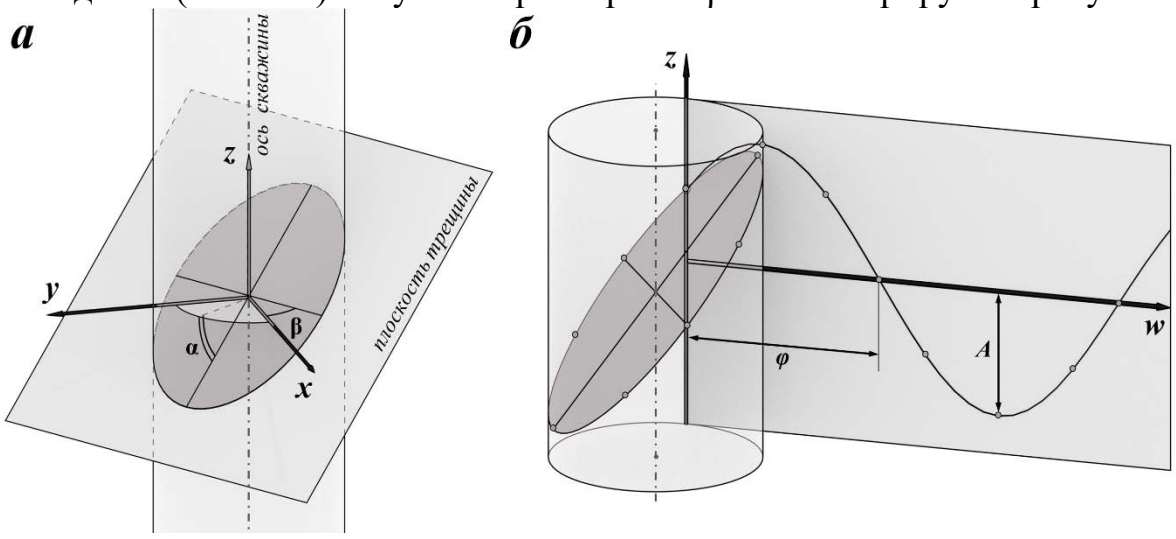


Рисунок 4 – Схема ориентации трещины, пересекающей измерительную скважину, (а) и развертка участка скважины (б)

На рисунке 4б представлена развертка участка скважины, пересеченной трещиной. При этом на плоскости *zw* трещина представляет собой гармонический сигнал со случайной начальной фазой, амплитуда *A* которого обусловлена углом падения α, а фаза φ – азимутом простирания β.

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 5а. Задача определения углов α и β в этом случае сводится к аппроксимации указанных точек функцией

$$z = a_0 + a_1 \cos(a_2 x + a_3), \tag{1}$$

и последующим нахождением α и β из

$$\alpha = \frac{180 \cdot arctg \dfrac{2a_1}{d_{ск}}}{\pi}, \tag{2}$$

$$\beta = \frac{a_3 \cdot 180}{\pi} - 90, \tag{3}$$

где a_0, a_1, a_2 и a_3 – коэффициенты регрессии (в данном случае a_1 = А, a_3 = φ).

Однако из рисунка 3б 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, основной смысл которого можно продемонстрировать выражением

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

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, 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

$$W_i = \frac{1}{\Delta I_i}, \tag{5}$$

где ΔI_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 α и β. Это особенно актуально при малом раскрытии трещин. На рисунке 5б представлены результаты определения относительных погрешностей оценок углов падения и простирания трещины Δα и Δβ при использовании для аппроксимации метода наименьших квадратов (МНК) и предложенного в настоящей работе взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК). Также на рисунке 5б 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.

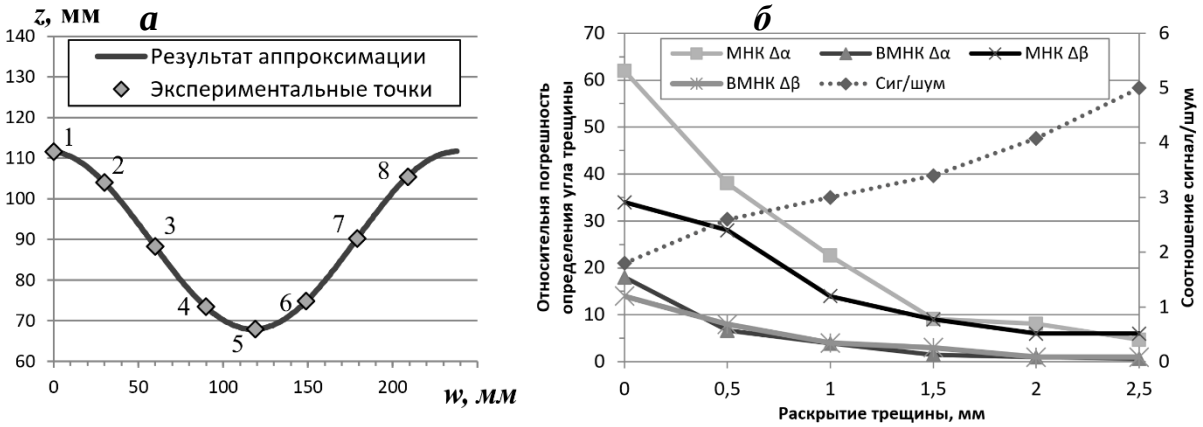


Рисунок 5 – Результат аппроксимации с использованием ВМНК (а) и относительные погрешности определения углов α и β (б) в зависимости от величины раскрытия трещины

Из рисунка 5б видно, что применение предложенного ВМНК существенно увеличивает точность определение углов α и β. 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 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований обоснован способ оптического сканирования скважин, оборудованных в приконтурной области массива, позволяющий в автоматизированном режиме выявлять пересекающие скважину трещины, а также определять углы их падения и простирания. Показано, что шероховатость и цвет поверхности скважины могут выступать помеховыми факторами при реализации сканирования, однако не оказывают существенного влияния на его результаты. Наибольшую точность способ 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.

Еще одним из 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 на рисунке 6. Эффективность реализации такого подхода была подтверждена на основе экспериментальных исследований на образцах пород.

Измерения производились специально разработанным электронным модулем, подключаемым к персональному компьютеру. В качестве источника света использовался лазерный модуль DSP6505-0415 с длиной волны $\boldsymbol{\lambda}$ =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÷15°. Сканирование поверхности образцов производилось по точкам вдоль профиля с шагом 0,5 мм. 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 50 измерений.

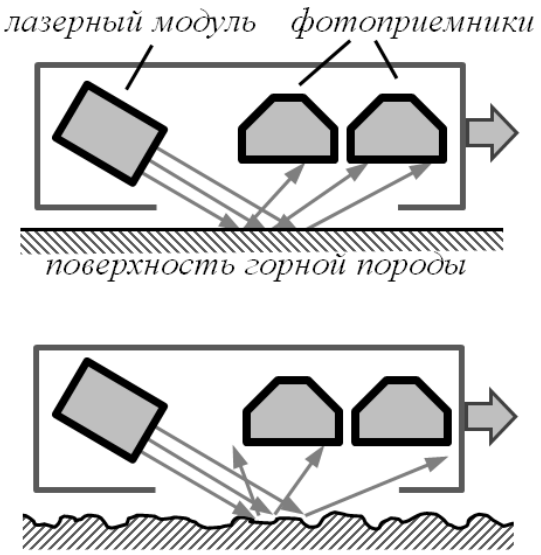


Рисунок 6 – Схемы оптического измерения уровня шероховатости поверхности

Результатом оптического сканирования каждого из образцов являлся профиль значений I_P, состоящий из 4 отрезков, соответствующих разным уровням шероховатости поверхности. Пример профиля, полученного на образце группы «Д1», приведен на рисунке 7*а*.

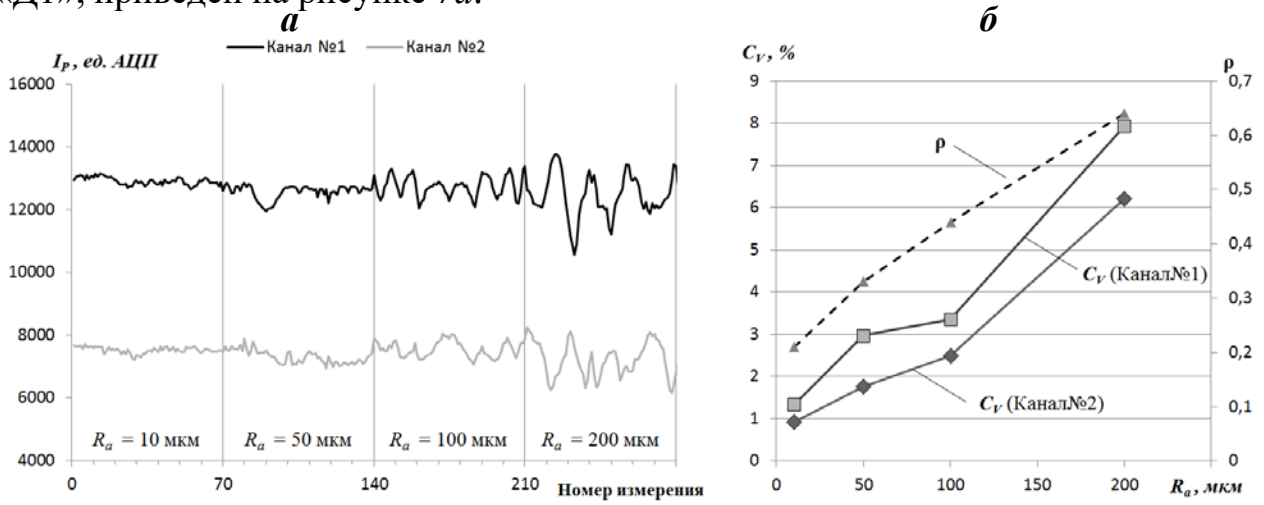


Рисунок 7 – Результаты оптического сканирования на примере образца группы «Д1» (*а*) и результаты расчета значений C_V и ρ (*б*)

Из рисунка 7 видно, что амплитуда колебаний I_P увеличивается с ростом R_a. Для оценки амплитуды колебаний использовался коэффициент вариации C_v, рассчитываемый для выборки значений, соответствующих одному уровню шероховатости

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu}, \tag{6}$$

где σ – стандартное отклонение, μ – 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 $R_{\text{сиг}}$

$$R_{сиг} = \frac{B_{xy}(0)}{\sqrt{B_{xx}(0) \cdot B_{yy}(0)}}, \quad (7)$$

где $B_{xy}(0)$ – значение взаимной корреляционной функции сигналов с 1 и 2 каналов при значении 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 ρ вводилась задержка сигнала первого канала относительно второго, равная 10 отсчетам (расстояния между фоторезисторами равно 5 мм).

Вычисленные значения C_V и ρ представлены на рисунке 7*б*. Из рисунка 7*б* видно, что с увеличением степени шероховатости наблюдается практически линейный рост C_V на обоих каналах. Кроме того, значения ρ также демонстрируют линейное возрастание. Это связано с тем, что при малых значениях R_a изменения I_P носят хаотичный характер, что отражается в виде низких значений ρ. С ростом R_a отдельные неровности проявляются более отчетливо, заставляя I_P изменятся волнообразно. При этом наблюдается рост корреляции сигналов, снятых вдоль одного профиля. Зависимости, приведенные на рисунке 7*б* характерны и для других пород, участвовавших в исследовании.

Описанный выше 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 измерялась интенсивности света I_o, отраженного от поверхности, последовательно освещаемой различными цветами: красным (λ = 625-740 нм), зеленым (λ = 550-565 нм), синим (λ = 450-480 нм), голубым (λ = 480-510 нм), лиловым (λ = 380-440 нм) и желтым (λ = 565-590 нм). Результат измерения I_o на различных длинах волн представлен на рисунке 8а в виде полярных диаграмм. Подобные полярные диаграммы представляют собой шестиугольники, каждый из которых характеризует цвет поверхности горной породы. Для удобства сравнения пород различных генотипов для каждой из полярных диаграмм были рассчитаны координаты центров масс (барицентров) $X_б$ и $Y_б$. Результат расчетов приведен на рисунке 8б.

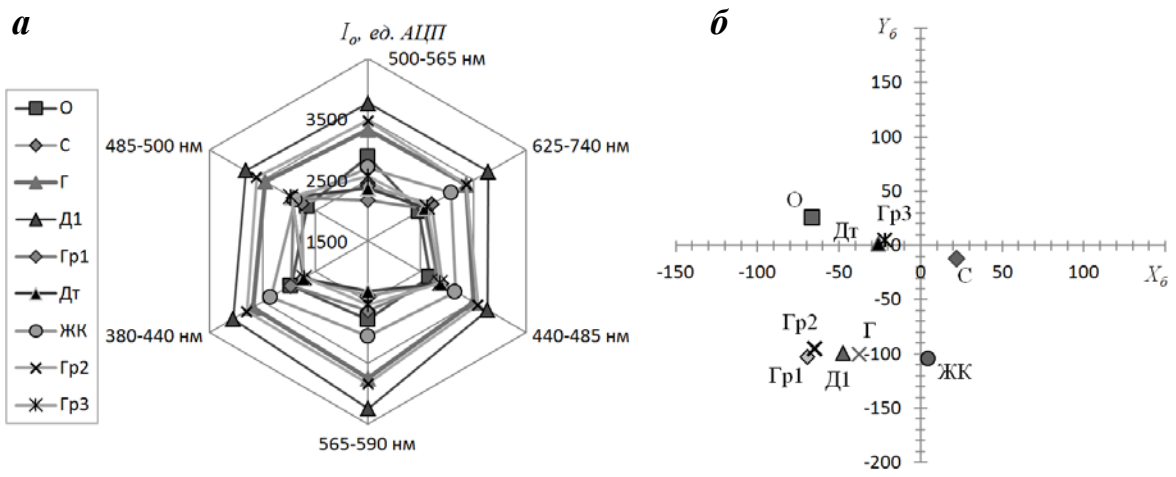


Рисунок 8 – Пример полученных полярных диаграмм распределения I_0 (а) и результаты расчета барицентров для всех групп образцов (б)

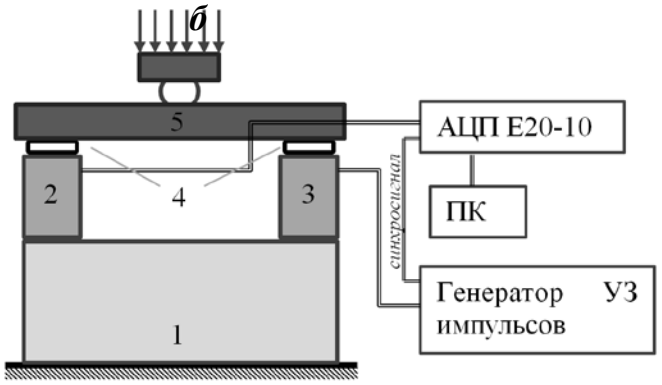
Из рисунка 8б видно, что с помощью оптического сканирования оказывается возможным разделение различных типов пород. Слабо разделяются породы «серых» оттенков (группы «Гр1»-«Гр2» и «Дт»-«Гр3»). Повысить различимость таких пород можно путем дополнительного учета площади полярной диаграммы (что эквивалентно оценке отражающей способности поверхности по отношению к белому свету).

Третья глава посвящена совместным акустическим и оптическим измерениям на образцах горных пород

Для анализа структурных неоднородностей в приконтурной области (например трещин и расслоений в кровле) используют активные акустические измерения в ультразвуковом (УЗ) диапазоне частот по схемам межскважинного прозвучивания или каротажа. Однако следует принять во внимание, что в практике каротажных исследований измерения производятся в водонаполненных скважинах, излучение сигналов происходит с помощью цилиндрических преобразователей через прослойку 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.

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 9.

а *б*



1 – образец; 2,3 – приемный и излучающий преобразователи; 4 – акустические развязки; 5 – стальная пластина

Рисунок 9 – Схема ультразвукового прозвучивания на образцах горных пород

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.

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

$$E = \sum_{i=1}^{n} A_i^2, \tag{8}$$

$$\Delta\omega_{эф} = \frac{1}{F_{\max}} \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega, \tag{9}$$

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

Пример определения E и $\Delta\omega_{эфф}$ приведен на рисунке 10, для удобства значения E нормированы по максимальному значению.

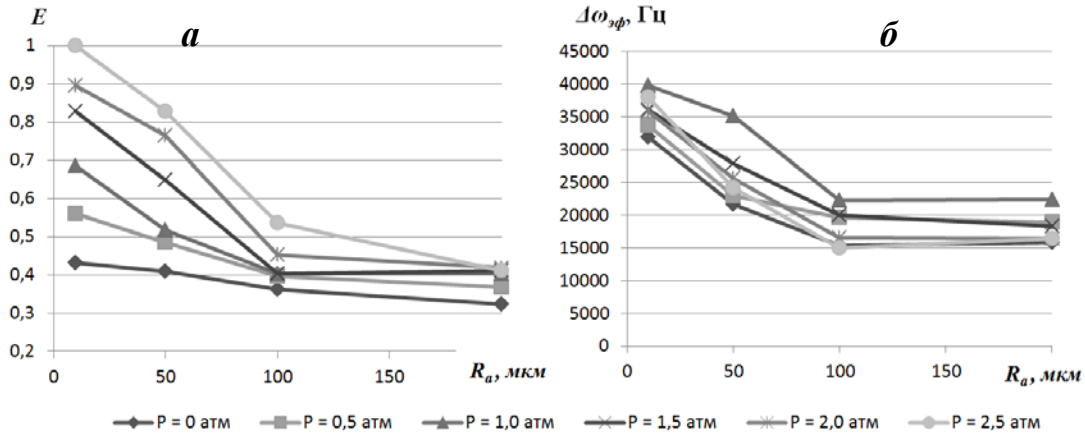


Рисунок 10 – Значения E (а) и $\Delta\omega_{эфф}$ (б) для образца группы «Гр1»

Из рисунка 10 видно, что увеличение шероховатости поверхности горной породы приводит к снижению энергии УЗ сигналов, а также сужению спектра. 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.

Использование ультразвукового каротажа позволяет устанавливать факт наличия и координату трещины, пересекающей измерительную скважину. Однако помимо установления факта нахождения трещины, важной информацией также является угол ее падения. При этом его определение с использованием ультразвукового каротажа на продольных волнах практически невозможно. С другой стороны, можно предположить, что изменение вектора поляризации поперечных волн может позволить установить искомый угол путем анализа волновых форм принятых сигналов. С целью установления влияния направления магистральных трещин, а также естественной слоистости пород на параметры поперечной волны с переменным вектором поляризации был предпринят ряд экспериментальных исследований. 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 «Тр»). Внешний вид образцов представлен на рисунке 11*а*.

Для установления влияния анизотропии образцов на параметры поперечных волн был подготовлен специализированный стенд, состоящий из двух преобразователей поперечных волн с точечным акустическим контактом, генератора ультразвуковых сигналов, предусилителя ПАЭФ-014 и аналого-цифрового преобразователя 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.

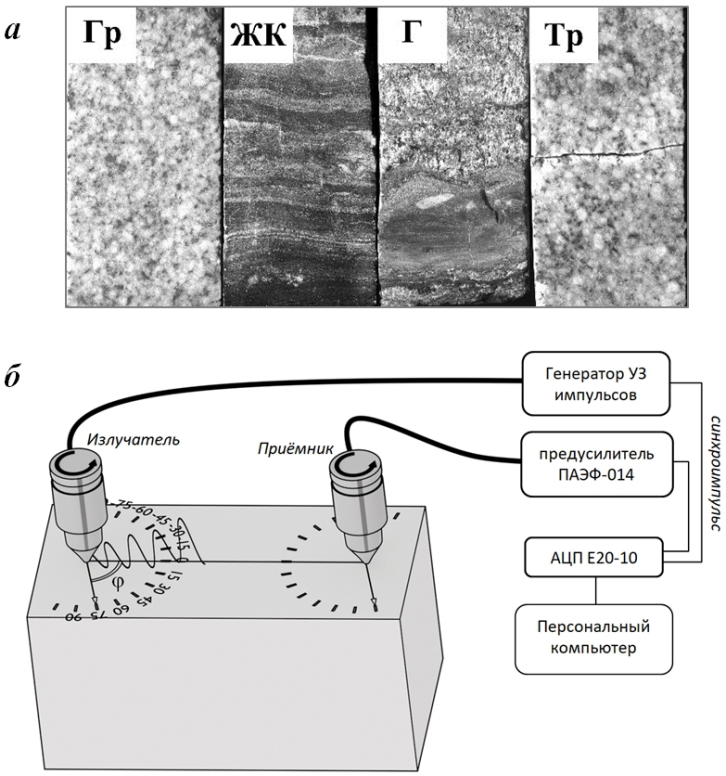


Рисунок 11 – Образцы горных пород (а) и схема их прозвучивания (б)

Прозвучивание производилось по схеме, представленной на рисунке 11б. На боковой поверхности образца устанавливались и закреплялись акустические преобразователи. Усилие прижима на протяжении эксперимента оставалось фиксированным и равным 10 Н и достигалось с использованием металлического груза. Излучающий и приемный преобразователи располагались так, чтобы векторы поляризации поперечных волн оказывались параллельными, а угол φ между направлением колебания частиц и длинной гранью образца составлял 90°. Измерения производились с шагом φ = 15° в диапазоне от минус 90° до плюс 90°. Таким образом, для каждого образца формировался массив из 13 волновых форм,

содержащих информацию об амплитудах, скоростях и спектральном составе поперечных волн.

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 12 представлены результаты расчета приращений амплитуды поперечной волны ΔA_S относительно минимально зафиксированной A_{Smin}.

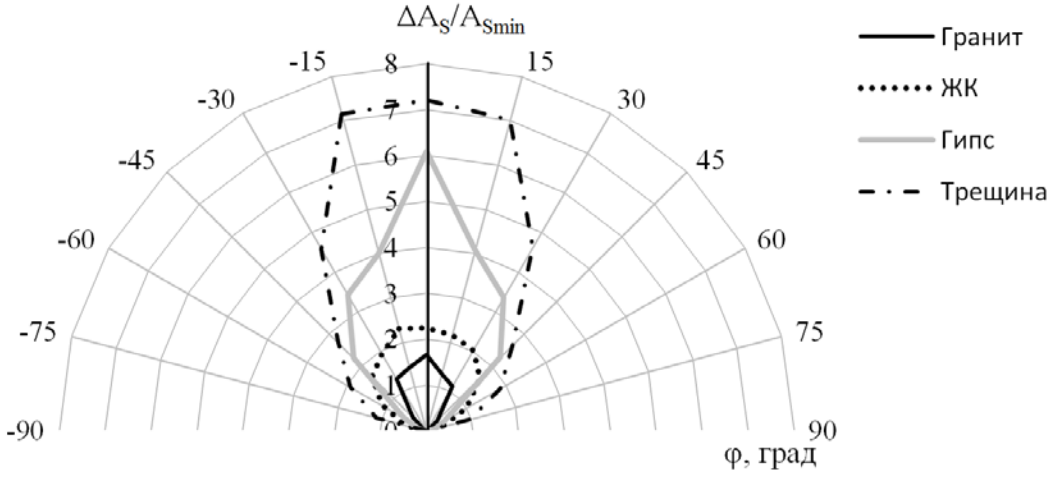
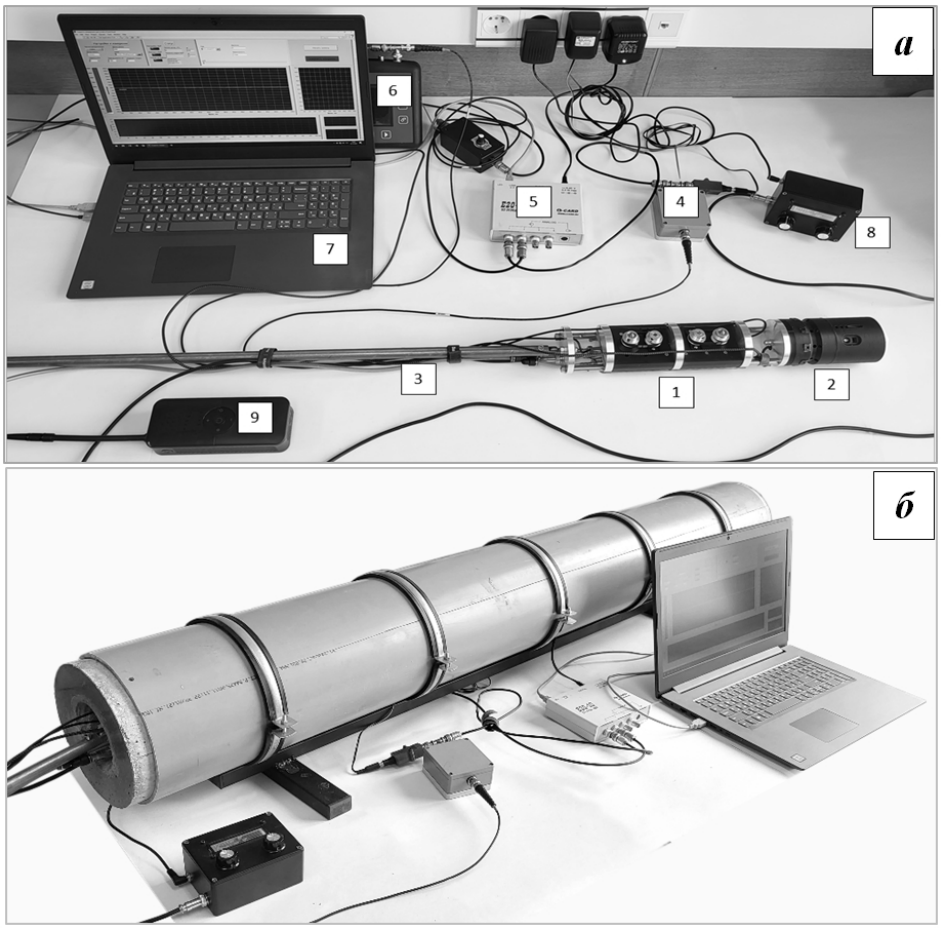


Рисунок 12 – Результаты экспериментального определения $A_S(\varphi)/A_{Smin}(\varphi)$

Из рисунка 12 видно, что с ростом степени анизотропии значения $\Delta A_S/A_{Smin}$ увеличиваются, при этом в большей степени при $\varphi = 0°$. Наибольшее изменение амплитуды наблюдается в случае наличия трещины. Полученные закономерности объясняются механизмом взаимодействия поперечных волн с границами слоев и берегами трещин. При углах $\varphi = 90°$ и $\varphi = -90°$ 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 иди воздухом поперечные волны будут полностью исчезать из-за пренебрежимо малых значений G. При угле $\varphi = 0$ 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 $A_S(\varphi)/A_{Smin}(\varphi)$.

Четвертая глава посвящена разработке аппаратурного и методического обеспечения комплексного оптико-акустического каротажа скважин.

На основе принципов оптического сканирования стенок скважины, а также проведенных лабораторных ультразвуковых исследований, описанных в предыдущих главах, была разработана конструкция комплексного каротажного оптико-акустического комплекса, а также изготовлен его опытный образец. Для проверки работоспособности каротажного комплекса был создан макет измерительной скважины. Общий вид использованного каротажного комплекса и физическая модель скважины представлены на рисунке 13.



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

Рисунок 13 – Общий вид оптико-акустического каротажного комплекса (а) и физическая модель скважины (б)

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. 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 в работах.

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 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 соответствие с ГОСТ 2789-73.

Акустические измерения производились с шагом 50 мм, при этом в каждой точке осуществлялась регистрация 7 волновых форм для углов φ от -45° до 45° с шагом 15° (максимальный диапазон поворота преобразователей в зонде). 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, измеренная 8 светочувствительными элементами, расположенными по периметру зонда, $I^{mp}_{1..8}$.

Результатом измерений на физической модели стали каротажные диаграммы, представленные вместе со схемой скважины на рисунке 6.4. 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.

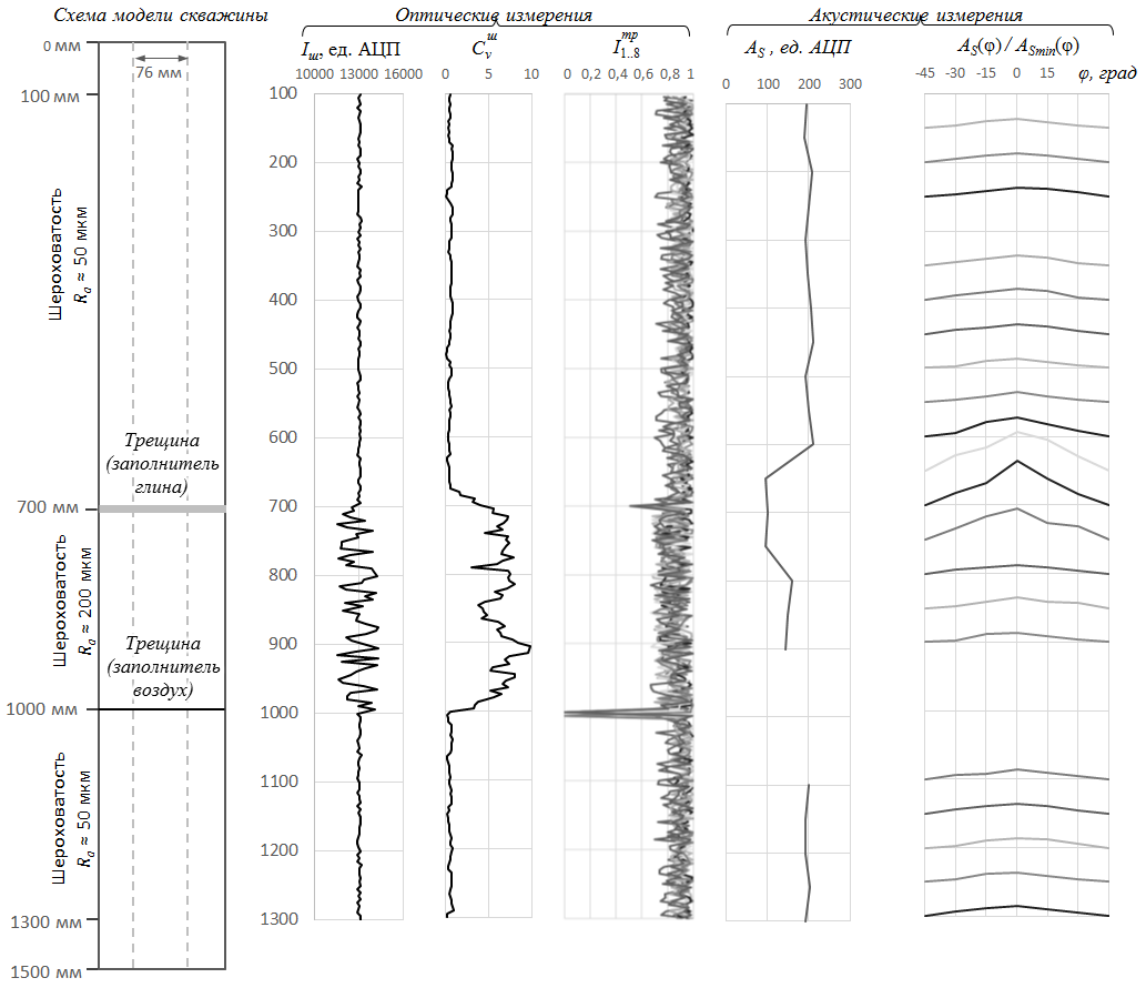


Рисунок 14 – Каротажные диаграммы, полученные на физической модели скважины

Набор каротажных диаграмм состоит из двух блоков, соответствующих оптическим и акустическим измерениям. В дополнение к измеренным значениям $I_ш$ был рассчитан коэффициент вариации $C_v^ш$ в скользящем окне шириной n = 10. На рисунке 14 видно, что при входе зонда в зону с высокой шероховатостью значения $C_v^ш$ 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 $I_{1..8}^{тр}$ указывает на ортогональное расположение трещины, однако аномалия на отметке 700 мм отличается низким соотношение 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 $\varphi = 0°$, 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).

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, угол падения и азимут 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 заполнителе 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 As производится с учетом ранее оцененной шероховатости;

- подтвердить границу между породами различных генотипов по изменению на этой границе акустических свойств, таких как скорость продольных V_p и поперечных V_s волн, а также амплитуду поперечных волн A_s;

- подтвердить или опровергнуть снижение прочности пород по значениям V_p в зоне резкого изменения шероховатости.

Таким образом, повышение производительности и надежности каротажных измерений в приконтурном массиве пород может быть достигнуто путем комплексирования результатов оптического сканирования и ультразвукового прозвучивания. В работе на основе результатов экспериментов на образцах показана взаимосвязь между анизотропией свойств пород и амплитудой поперечной волны с управляемым вектором поляризации. Установлено, что наибольшее изменение амплитуды наблюдается при ортогональном расположении слоистости пород или магистральной трещины и направлением смещения частиц при сдвиговых колебаниях. Для проверки эффективности совместных ультразвуковых и оптических измерений была создана модель измерительной скважины, а также изготовлен специализированный каротажный комплекс. 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. Результаты испытаний на физической модели доказали эффективность комплекса. Высокая производительность предлагаемого каротажного метода может быть достигнута выборочным применением трудоемкого, но более информативного УЗ прозвучивания только в тех зонах, где по результатам оптического сканирования обнаружены признаки наличия зон нарушения сплошности приконтурного массива. Определение ориентации трещин возможно на основе совместного анализа результатов оптического сканирования и прозвучивания поперечными волнами с управляемым вектором поляризации.

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 аппаратурное 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ и индексированные базой данных Scopus

1. Николенко П. В., Зайцев М. Г. Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами //

Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – No 3. – С. 5–15. DOI:10.25018/0236_1493_2022_3_0_5.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Публикации в прочих изданиях

1. 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

2. 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