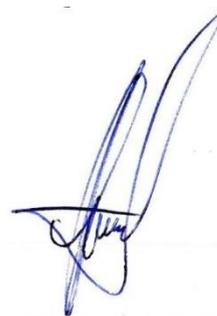


**Кормнов Алексей Алексеевич**



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРЫ И  
НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТЯХ  
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

**Специальность 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая  
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»**

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2018

**Работа выполнена** в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

**Научный руководитель** Николенко Пётр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ «МИСиС»

**Официальные оппоненты:**

Яковлев Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, Общество с ограниченной ответственностью «Институт горной геомеханики и геофизики – Межотраслевой научный центр ГЕОМЕХ» (ООО «МНЦ ГЕОМЕХ»), генеральный директор, г. Санкт-Петербург

Жуков Виталий Семёнович, доктор технических наук, старший научный сотрудник. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), главный научный сотрудник, МО, посёлок Развилка

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФГБУН ПФИЦ УрО РАН)

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.10 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 6, стр.2, ауд. А- 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИТУ «МИСиС» <http://misis.ru/science/dissertations/2018/3374/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



С.А. Эпштейн

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Потеря устойчивости подземных горных выработок является обычно следствием динамики взаимодействующих между собой полей разномасштабной поврежденности и напряжений в окружающем выработки массиве. Вот почему наличие информации о параметрах этих полей и их пространственно-временных изменениях является необходимым условием надежного решения соответствующих прогнозных задач геомеханики. Получение указанной информации возможно с использованием широкого спектра геофизических методов геоконтроля, важное место среди которых занимают методы ультразвукового (УЗ) каротажа и межскважинного прозвучивания с использованием пробуренных в приконтурном массиве контрольных скважин. Традиционный вариант реализации этих методов предполагает применение в качестве зондирующих – импульсных УЗ сигналов, а в качестве информативных параметров – скорости их распространения и (или) затухания в исследуемой геосреде. В то же время известно, что информативность, помехозащищенность и чувствительность импульсных УЗ измерений при оценке структурной поврежденности массива и его напряженно-деформированного состояния (НДС) чрезвычайно ограничены. В связи с этим представляется актуальным решение задач теоретического, методического и аппаратного характера, направленных на повышение эффективности и совершенствование УЗ измерений в окрестностях выработок за счет использования шумовых зондирующих акустических сигналов и их последующей корреляционной обработки, а также обоснования и разработки на этой основе соответствующего метода геоконтроля.

Настоящая работа проводилась в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 2014/113 на 2014 -2016 гг. в сфере научной деятельности по теме «Оценка структуры, свойств и состояния горных пород на основе использования пассивных и активных шумовых акустических сигналов».

**Цель работы** состоит в установлении закономерностей влияния структурных неоднородностей и напряжений на корреляционные характеристики распространяющегося в геосреде УЗ сигнала в виде стационарного случайного шума, обосновании и разработке на этой основе метода диагностики состояния массива в окрестностях горных выработок.

**Идея работы** заключается в использовании для оценки строения, структурных неоднородностей и пространственно-временной динамики НДС приконтурного массива изменений параметров автокорреляционной и взаимной

корреляционной функций распространяющегося в нём ультразвукового непрерывного шумового сигнала.

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

1. Межскважинное ультразвуковое прозвучивание и каротаж с использованием стационарного узкополосного шумового сигнала со средним равным нулю (в качестве зондирующего), а также параметров его корреляционных функций в точках приёма (в качестве информативных) позволяют достичь высокой чувствительности и надёжности диагностики геологического разреза, структурной неоднородности и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработок.

2. Оптимальный алгоритм структурной диагностики кровли горных выработок предполагает пошаговое перемещение каротажного зонда вдоль контрольной скважины и измерение коэффициента взаимной корреляции  $\rho$  и интервалов корреляции  $\tau_v$  и  $\tau_n$  ультразвуковых шумовых сигналов, принимаемых в точках, расположенных симметрично выше и ниже точки излучения. При этом величина  $\rho$  позволяет судить о наличии и степени структурной неоднородности околоскважинного массива между точками приема, а соотношение величин  $\tau_v$  и  $\tau_n$  - о расположении границы неоднородности относительно точек излучения и приема.

3. Минимизация помехового влияния контактных условий двух расположенных симметрично относительно излучателя приемников шумовых УЗ сигналов на результаты диагностики напряжений в окрестностях выработки корреляционным методом межскважинного прозвучивания достигается увеличением усилия прижима приемников к стенкам скважины до момента прекращения изменений интервалов корреляции сигналов на каждом из них. Измеренные после достижения этого момента коэффициенты взаимной корреляции указанных сигналов на различных глубинах контрольных скважин наиболее точно отражают пространственное распределение напряжений в приконтурном массиве.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:**

- качественным совпадением установленных по результатам компьютерного моделирования, лабораторных и натуральных экспериментов закономерностей изменения корреляционных информативных параметров УЗ контроля в функции от дефектности и напряженного состояния геосреды, представительным объемом экспериментальных данных, лежащих в основе указанных закономерностей;

- использованием при проведении исследований апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов и программ компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных, а также средств измерений с высокими метрологическими характеристиками;

- удовлетворительным совпадением данных контроля исследуемых объектов геосреды УЗ корреляционным и альтернативными методами.

**Методы исследований** включают: анализ и обобщение научно-технической информации; теоретический анализ потенциальных возможностей, схем и информативных параметров ультразвукового корреляционного метода (УКМ) геоконтроля; компьютерное моделирование влияния структурной неоднородности геосреды на корреляционные характеристики шумового УЗ сигнала; лабораторный эксперимент на образцах горных пород различной поврежденности, а также образцах, подвергаемых механическому нагружению с проведением в них УЗ измерений; натурные эксперименты в приконтурном массиве с использованием ультразвукового корреляционного метода контроля.

**Научная новизна работы заключается:**

- в установлении закономерностей изменения информативных параметров УКМ контроля под влиянием структурных неоднородностей и напряженного состояния геосреды;

- в обосновании возможных и выборе наиболее эффективных схем реализации и информативных параметров УКМ изучения массива в окрестностях выработок;

- в обосновании способов определения структурной поврежденности и пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве на основе его межскважинного УЗ прозвучивания и каротажа с использованием шумовых сигналов и их корреляционной обработки;

- в разработке принципов построения аппаратного обеспечения УКМ на основе сочетания аппаратных и программных средств формирования и статистической обработки сигналов.

**Практическая значимость и реализация результатов.** В рамках диссертации разработана «Методика структурной диагностики пород кровли горных выработок с использованием ультразвукового корреляционного каротажа». Её применение позволяет повысить достоверность прогноза устойчивости выработок при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. Методика используется ГИ УрО РАН на рудниках ПАО «Уралкалий», а также передана в ГИ КНЦ РАН и ИГД ДВО РАН, которыми планируется к использованию на горнорудных предприятиях соответствующих регионов. Материалы диссертационной работы вошли в учебное пособие «Физико-

технический контроль и мониторинг процессов горного или нефтегазового производства», которое используется при подготовке специалистов в НИТУ «МИСиС».

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены: на 18-й Международной экологической конференции студентов и молодых ученых (МГГУ, Москва, 2014 г.); на научных симпозиумах «Неделя горняка» (НИТУ «МИСиС», Москва 2015 - 2017 гг.); на X Международной школе-семинаре и VI Российско-китайском научно-техническом форуме (КНЦ РАН, Апатиты, 2016 г.); на Практической конференции по вопросам реализации научных разработок (Минобрнауки, Москва, 2016 г.).

Результаты работы были представлены и удостоены Диплома на Всероссийском конкурсе научно-технического творчества молодёжи (Москва, 2016 г.), а также отмечены грантом Американского акустического общества – ASA (2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 6 – в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 142 источников, содержит 47 рисунков и 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* анализируется современное состояние проблемы информационного обеспечения оценки и прогноза устойчивости горных выработок, а также роль, которую играют в её решении геофизические методы, в частности, активные УЗ методы межскважинного прозвучивания и каротажа. Отмечена роль в развитии этих методов таких учёных, как Ватолин Е.С., Глушко В.Т., Данилов В.Н., Козырев А.А., Кузнецов О.Л., Мамбетов Ш.А., Носов В.Н., Рубан А.Д., Савич А.И., Силаева О.И., Турчанинов И.А., Тютюнник П.М., Шкуратник В.Л., Яковлев Д.В., Ямщиков В.С. и др. Показано, что несмотря на известные достоинства УЗ методов, они во многом не удовлетворяют требованиям практики при оценке структурной поврежденности и НДС приконтурного массива, прежде всего с точки зрения информативности и помехоустойчивости. В основном это обусловлено тем, что их реализация предполагает использование импульсных УЗ сигналов и их кинематических и динамических параметров в качестве информативных. Первые из них обладают малой абсолютной  $\Delta\theta$ , а вторые – малой относительной  $I_\theta$  информативностью. Кроме того, значительное затухание

ультразвука в геосреде вынуждает использовать высокое напряжение возбуждения соответствующих скважинных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), что ограничивает применение импульсных ультразвуковых методов в шахтных условиях. Показано, что потенциально перспективным направлением совершенствования традиционных скважинных ультразвуковых измерений в приконтурном массиве является использование непрерывных стационарных шумовых сигналов в качестве зондирующих и параметров их корреляционных характеристик в качестве информативных.

На основе анализа материалов первой главы были сформулированы приведённая выше цель и следующие задачи диссертационного исследования:

1. Теоретическое обоснование принципов, информативных параметров и схем реализации скважинного УЗМ диагностики структуры и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях выработок.
2. Компьютерное и физическое моделирование влияния структурных неоднородностей и НДС геосреды на корреляционные характеристики распространяющегося в ней ультразвукового шумового сигнала.
3. Компьютерное и физическое моделирование влияния контактных условий акустических преобразователей с геосредой на информативные параметры УЗМ контроля.
4. Обоснование и разработка аппаратного обеспечения и способов контроля состояния приконтурной области массива горных пород на основе скважинных УЗ корреляционных измерений.
5. Апробация разработанного скважинного ультразвукового корреляционного метода контроля состояния массива в окрестностях горных выработок в натуральных условиях.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению теоретических предпосылок ультразвукового корреляционного метода диагностики строения, структуры и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях выработок.

Рассмотрен условно безграничный объём геосреды, в котором действует источник непрерывного стационарного шумового УЗ сигнала с шаровой симметрией диаграммы направленности. В каждой точке этого объёма с координатами  $x_i, y_i, z_i$  имеем акустическое поле давления  $p(x_i, y_i, z_i, t_i)$ , являющееся комплексной амплитудно-фазовой функцией как координат, так и текущего времени  $t_i$ . Если физически реализуема возможность помещения в любую точку геосреды акустических приёмников давления, пространственное распределение корреляционных характеристик акустического поля в контролируемом объёме может быть описано корреляционной матрицей вида

$$B_{ij} = \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n1} & B_{n2} & \dots & B_{nn} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где элементы, соответствующие условию  $i = j$ , - автокорреляционные функции (АКФ) принятых УЗ сигналов, а элементы, для которых  $i \neq j$ , - взаимные корреляционными функции (ВКФ) этих сигналов.

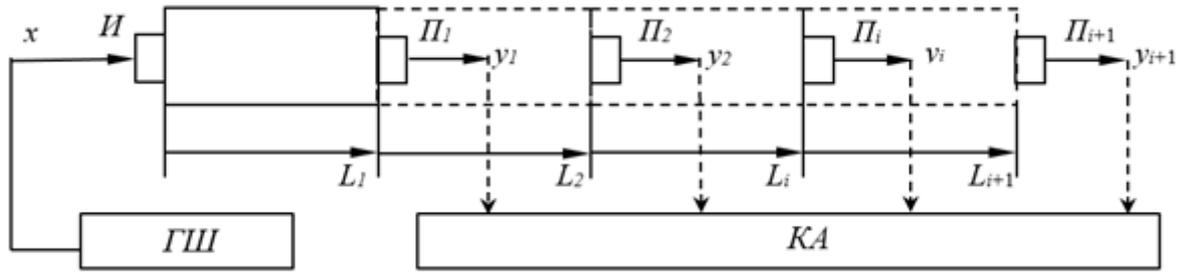
Матрица (1) может рассматриваться в качестве модели, отражающей параметры структуры ( $C_1$ ), свойств ( $C_2$ ) и состояния ( $C_3$ ) исследуемого объёма геосреды, поскольку  $B_{ij} = f(C_1, C_2, C_3)$ . В случае, если акустическое поле в исследуемом объёме стационарно по  $t$  и однородно по  $x, y, z$ , то элементы матрицы (1) будут являться функцией модуля вектора  $\bar{L}$ , определяющего положение приёмника  $П_i$  относительно излучателя  $И$ . Если геосреда однородна, но анизотропна, то элементы матрицы (1) определяются не только модулем, но и аргументом вектора  $\bar{L}$ . Распространение ультразвуковых шумовых сигналов в неоднородной геосреде всегда сопровождается различными волновыми явлениями, приводящими к изменениям их амплитудных, частотных и фазовых характеристик, а значит и декорреляции. Поэтому элементы матрицы для неоднородного (в общем случае, по всем трём параметрам  $C_1, C_2, C_3$ ) массива будут зависеть от координат точек приёма, то есть  $B_{ij} = F(x_i, y_i, z_i)$ . Таким образом, измеряя в этих точках информативные параметры АКФ и ВКФ шумовых УЗ сигналов, можно получить набор матриц информативных параметров, описывающих пространственное распределение параметров  $C_1, C_2, C_3$ .

Обобщённая схема реализации ультразвукового корреляционного метода геоконтроля (рис.1) предполагает возбуждение излучающего пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП)  $И$  сигналом  $x$  от генератора шума (ГШ). С помощью излучающего ПЭП  $И$  ультразвуковой сигнал излучается в исследуемую область, пройдя которую, принимается приёмными ПЭП  $П_i$ , подключёнными к корреляционному анализатору (КА).

Участки массива между любыми приемными акустическими преобразователями  $П_i$  могут рассматриваться как линейные системы, частотные характеристики  $H_j(f)$  которых аналогичны характеристикам фильтра нижних частот (ФНЧ)

$$H_j(f) = \exp[-\alpha_j(f) \cdot L_j], \quad (2)$$

где  $\alpha_j(f)$  – частотно-зависимое затухание геосреды на базе  $L_j = (L_i - L_{i-1})$  контроля между соответствующими приемниками.



**Рисунок 1** - Обобщенная схема УЗ корреляционного контроля геосреды

Пусть электрический сигнал  $x$ , возбуждающий излучающий ПЭП (с резонансной частотой  $f_0$ , полосой частот  $\Delta f$  и коэффициентом электроакустического преобразования  $k_1$ ), является стационарным белым шумом со средним  $\mu = 0$  и амплитудным спектром  $G_x(f) = A = const$ . Если коэффициент акустоэлектрического преобразования приемных ПЭП равен  $k_2$ , то спектральная плотность амплитуд принятых сигналов может быть записана в виде

$$G_{y_i}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot H_j(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \exp[-\alpha_j(f) \cdot L_j], \quad (3)$$

$$G_{y_{(i+1)}}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot H_{j+1}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \exp[-\alpha_{j+1}(f) \cdot L_{j+1}]. \quad (4)$$

С учётом соотношений (3), (4), используя известную взаимосвязь корреляционных и спектральных характеристик шумовых сигналов, их ВКФ (для  $y_i$  и  $y_{(i+1)}$ ) и АКФ (для  $y_i$ ) можно записать в виде

$$B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_{(i+1)}(t + \tau) dt = \\ = (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp[-\alpha_i(f) L_i - \alpha_{(i+1)}(f) L_{(i+1)}] \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau, \quad (5)$$

$$B_{y_i/y_i}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_i(t + \tau) dt = \\ = (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp[-2\alpha_i(f) L_i] \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau, \quad (6)$$

где  $T$  – время интегрирования корреляционного анализатора.

В выражениях (5), (6): первый из сомножителей - константа, зависящая от характеристик элементов электроакустического тракта аппаратуры; второй - отражает частотно-зависимое затухание сигнала на контролируемой базе геосреды, которое в решающей степени определяется ее поврежденностью; третий - описывает огибающую ВКФ (АКФ) и при определенных схемах и методиках измерений характеризует структурную неоднородность геосреды и ее дефектность; четвертый - несет информацию о смещении частоты  $f_0$  максимума спектральной

плотности принятого сигнала, которое определяется крутизной характеристики  $H_i(f)$ , а значит структурными особенностями  $i$  – го участка. Таким образом, функции (5) и (6) характеризуют структурную неоднородность и поврежденность геосреды, так как любые их формы приводят к декорреляции принимаемых сигналов.

Механическое нагружение горной породы в зависимости от стадии деформирования сопровождается структурными изменениями, связанными с процессами уплотнения или дезинтеграции. Поэтому параметры АКФ и ВКФ чувствительны и к изменению напряжения  $\sigma$ . В частности, для одноосного НДС, АКФ шумового УЗ сигнала, прошедшего базу  $L_i$  геоматериала (с модулем объёмной упругости  $K$ ) может быть описана выражением:

$$B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_{(i+1)}(t + \tau) dt =$$

$$= (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp\{-2\alpha_i(f)L_i[1 + \sigma / (3K)]^{-1.5}\} \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau. \quad (7)$$

Анализ характеристик и возможностей шумовых УЗ сигналов показал, что они позволяют контролировать значительные базы геосреды при относительно небольшом напряжении возбуждения и ограниченной ширине спектра  $\Delta F$ . Благодаря большой длительности  $T_c$ , эти сигналы могут быть отнесены к сложным, для которых  $\mu = (\Delta F \times T_c) \gg 1$ , что делает их потенциально помехоустойчивыми и обеспечивает закачку в массив значительной энергии. Например, при ПЭП с добротностью  $Q = 10$  и  $F_0 = 100$  кГц для этого достаточно, чтобы время интегрирования корреляционного анализатора удовлетворяло условию  $T \geq 1$  мс, что вполне реализуемо, если УЗ сигнал стационарен, а контактные условия ПЭП с массивом в течение указанного времени неизменны. Кроме того, следует иметь в виду, что возбуждение ПЭП, как и любой другой инерционной колебательной системы, более эффективно непрерывным, чем импульсным сигналом.

Проведённый с учётом выражений (5-7) анализ изменений ВКФ и АКФ под влиянием структурных неоднородностей, поврежденности и динамики НДС позволил обосновать следующие информативные параметры ультразвукового корреляционного метода. Это, во-первых, связанные с затуханием УЗ сигнала значения дисперсий  $B_{y_i/y_{(i+1)}}(0)$  и  $B_{y_i/y_i}(0)$ . Во-вторых, период  $\tau_0 = 1/f_0$  функций  $B_{y_i/y_{(i+1)}}$  и  $B_{y_i/y_i}$ . В-третьих, смещение  $\Delta \tau$  максимума функции  $B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau)$ , которое соответствует времени задержки УЗ сигнала на базе  $L = L_{i+1} - L_i$ , и позволяет определить скорость его распространения  $C = L/\Delta \tau$ . В-четвертых, коэффициенты корреляции  $\rho$  соответствующих функций, которые для ВКФ и АКФ равны:

$$\rho_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) = \frac{B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau)}{\sqrt{B_{y_i}(0) \cdot B_{y_{(i+1)}}(0)}}, \quad (8)$$

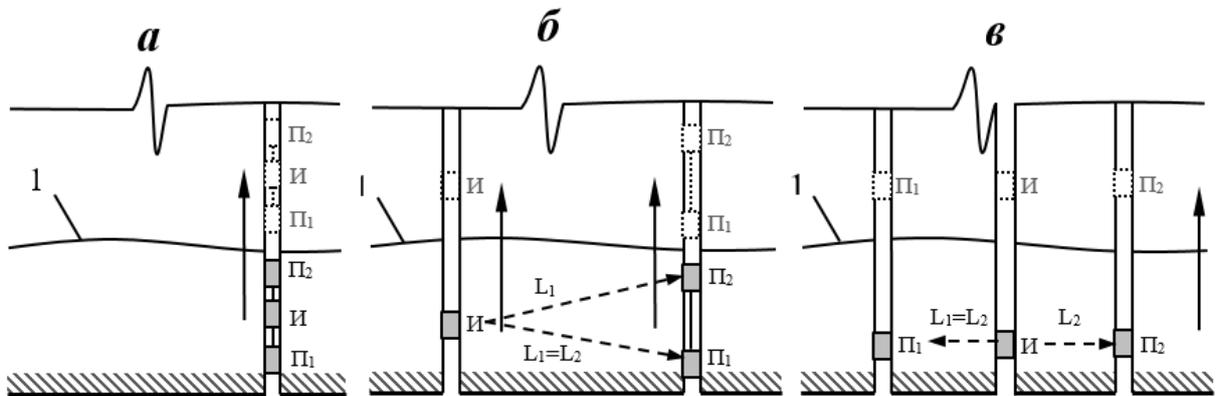
$$\rho_{y_i/y_i}(\tau) = \frac{B_{y_i/y_i}(\tau)}{B_{y_i/y_i}(0)}. \quad (9)$$

Ещё одним информативным параметром является интервал корреляции  $\tau_{ук}$  УЗ сигнала, который с увеличением неоднородности геосреды увеличивается и для ВКФ и АКФ определяется формулами (10) и (11) соответственно

$$\tau_{ук} = \frac{1}{B_{y_i/y_{(i+1)}}(0)} \int_0^{+\infty} B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) d\tau, \quad (10)$$

$$\tau_{ук} = \frac{1}{B_{y_i/y_i}(0)} \int_0^{+\infty} B_{y_i/y_i}(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Важнейшим фактором, определяющим потенциальные возможности УКМ контроля приконтурного массива, является многообразие схем его реализации. Наиболее эффективными из них являются межскважинное прозвучивание и каротаж с симметричным расположением приёмников  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  относительно излучателя И (рис.2), которое позволяет исключить влияние базы контроля на связанные с ВКФ измеряемые информативные параметры.



**Рисунок 2-** Схемы ультразвуковых корреляционных измерений: 1 – граница между основной и непосредственной кровлей

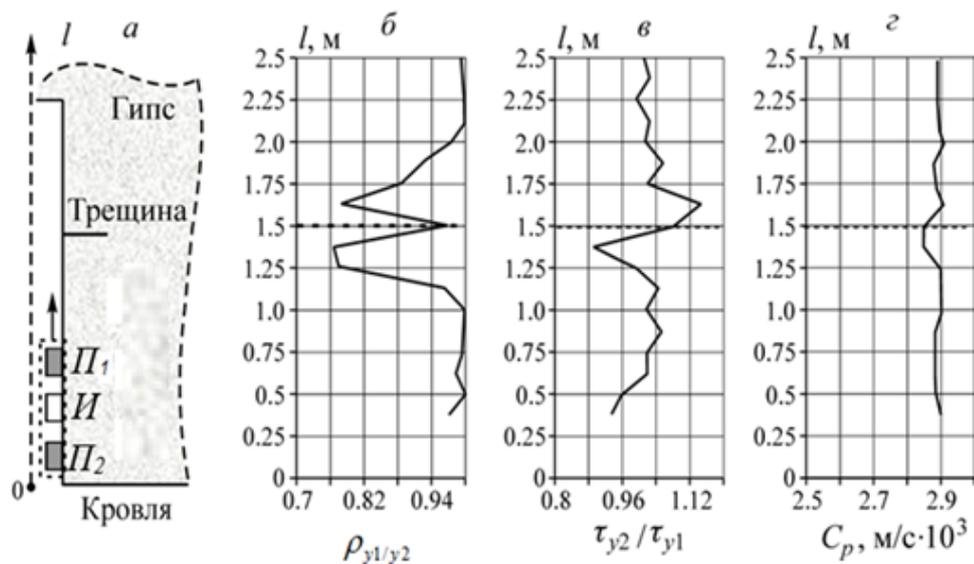
**Третья глава** посвящена компьютерному и физическому моделированию влияния структурных неоднородностей и НДС геосреды на корреляционные характеристики распространяющегося в ней УЗ шумового сигнала. Моделирование методом конечных элементов осуществлялось применительно к схеме каротажа, представленной на рис. 2а, с использованием в качестве информативных параметров коэффициента взаимной корреляции  $\rho_{y_1/y_2}$  сигналов  $y_1$  и  $y_2$  на выходе  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  соответственно, а также отношения интервалов корреляции этих сигналов  $\tau_{y_1}$  и  $\tau_{y_2}$ . Значения  $\rho_{y_1/y_2}$  и  $\tau_{y_2}/\tau_{y_1}$  определялись с использованием формул (8) и (10). В численных экспериментах исследовалось влияние на указанные информативные параметры единичной трещины, а также ортогональной по отношению к контрольной скважине границы различных типов пород, пересекаемых скважиной.

В осесимметричном пространстве задавалась модель массива в виде цилиндра, радиус и высота которого были много больше исследуемого участка кровли, представленного гипсом. Граница кровли совпадала с нижней границей цилиндра, в центре которого моделировалась вертикальная скважина диаметром 80 мм и высотой 8 м. На высоте 1,5 м от границы кровли задавалась симметричная относительно оси скважины и ортогональная ей трещина в виде прямоугольника со стороной 0,5 м. Раскрытие трещины составляло 0,1 мм. Она была заполнена породой и имела пониженные относительно вмещающей геосреды значения модуля упругости и плотности. Наличие виртуального излучателя  $I$  отражалось в модели путем задания на грани конечного элемента граничных условий в виде горизонтальных перемещений, соответствующих реальному УЗ шумовому сигналу. Наличие виртуальных приемников  $P_1$  и  $P_2$  отражалось путем регистрации горизонтальных смещений в точках, отстоящих вверх и вниз на 25 см от точки размещения излучателя. Виртуальный скважинный зонд перемещался по скважине с шагом 25 см на глубину до 2,5 м. В точке  $I$  в массив излучался шумовой УЗ сигнал длительностью 10 мс, существенно меньшей времени прохождения сигнала до вертикальных и верхней горизонтальной границ модели. Принятые в точках  $P_1$  и  $P_2$  сигналы подвергались корреляционной обработке, целью которой было нахождение величин  $\rho_{y1/y2}$  и  $\tau_{y2}/\tau_{y1}$ . В дополнение к ним определялась скорость распространения продольной волны  $C_p$ , измеряемая с учетом расстояния между излучающим и приемными ПЭП и времени первого вступления акустического сигнала.

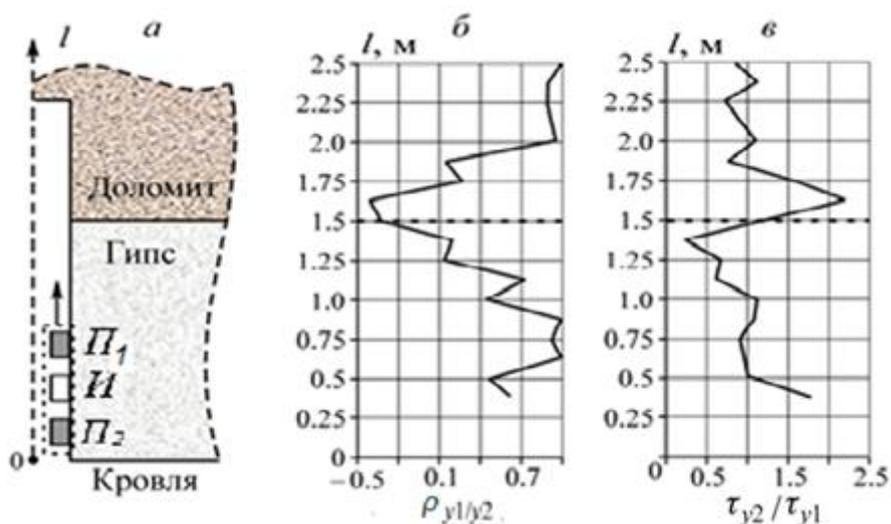
Анализ представленных на рис.3 данных показывает, что при приближении “зонда” к трещине  $\rho_{y1/y2}$  падает, достигая минимума, когда трещина находится между излучателем  $I$  и одним из приемников  $P_{1,2}$ . Когда  $I$  находится ровно над трещиной, наблюдается локальное увеличение  $\rho_{y1/y2}$ , что, связано с симметричностью расположения  $P_1$  и  $P_2$ . Когда трещина находится между точками расположения  $P_1$  и излучателя  $I$ , наблюдается резкое возрастание  $\tau_{y1}$  на  $P_1$ , что приводит к уменьшению  $\tau_{y2}/\tau_{y1}$ . В случае, когда трещина находится между  $I$  и  $P_2$ , увеличение  $\tau_{y2}$  приводит к росту  $\tau_{y2}/\tau_{y1}$ . При этом относительное изменение  $C_p$  в зоне трещины составляет всего  $\sim 2\%$ , что соизмеримо с погрешностью большей части современной УЗ аппаратуры.

Результаты компьютерного эксперимента по установлению влияния на корреляционные параметры УЗ сигнала границы между двумя слоями пород в кровле с различной акустической жесткостью представлены на рис. 4. Такая

граница также вызывает декорреляцию шумового сигнала. Закономерности, полученные при компьютерном моделировании, были подтверждены в ходе физических экспериментов на плите мрамора с выходящей на поверхность единичной сомкнутой трещиной, а также двухслойном блоке, склеенном из мрамора и плексигласа.



**Рисунок 3** – Схема, используемая при моделировании (а), и зависимости изменения параметров  $\rho_{y1/y2}$  (б),  $\tau_{y2}/\tau_{y1}$  (в) и  $C_p$  (г) с глубиной



**Рисунок 4** – Схема, используемая при моделировании (а), и зависимости изменения параметров  $\rho_{y1/y2}$  (б) и  $\tau_{y2}/\tau_{y1}$  (в) с глубиной

На основе компьютерного и физического моделирования была также проведена оценка чувствительности каротажа при выявлении трещин в прискважинной области в зависимости от их протяженности  $l$ , угла наклона  $\beta$  к оси скважины и расстояния  $L$  от ее контура. Было установлено, что возможно надёжное выявление трещин при  $l \geq (1/4) \lambda$ ,  $L \leq 2\lambda$  ( $\lambda$ -длина волны на частоте  $f_0$ ) и  $\beta \geq 30^\circ$ .

Для оценки возможности использования УКМ для контроля изменений НДС в приконтурном массиве была экспериментально изучена динамика корреляционных характеристик шумового УЗ сигнала при его распространении в образцах горных пород в условиях изменяющихся напряжений. Для проведения исследований была использована выборка из 11 предварительно подвергнутых цензурированию образцов каменной соли Верхнекамского месторождения высотой 70 и диаметром 35 мм. Пять образцов из выборки были использованы для определения  $\sigma_{сж}$ , которое составило 27,1 Мпа, и границ стадий деформирования, которые составили:  $(0 \div 0,18)\sigma_{сж}$  – для начальной стадии (I);  $(0,18 \div 0,46)\sigma_{сж}$  – для линейно-упругой стадии (II);  $(0,46 \div 0,76)\sigma_{сж}$  – для упруго-пластической стадии (III);  $(0,76 \div 1,00)\sigma_{сж}$  – для пластической предельной стадии (IV).

Оставшиеся образцы, разделенные на 2 равные группы, подвергались одноосному механическому нагружению и прозвучиванию шумовым УЗ сигналом с  $f_0 = 400$  кГц и  $\Delta f = 50$  кГц. При этом образцы первой группы прозвучивались в направлении механического нагружения, а УЗ сигнал с выхода приемного ПЭП подвергался оцифровке, а затем автокорреляционной обработке (АКО). Образцы второй группы прозвучивались в направлении, перпендикулярном направлению механического нагружения. Причем, излучающий ПЭП размещался в центре образца (по его высоте), а два приемных - на диаметрально противоположной его стороне симметрично относительно оси излучения на расстоянии 2 см друг от друга. Сигналы с выхода ПЭП после оцифровки подвергались взаимной корреляционной обработке (ВКО). УЗ измерения проводились при уровнях напряжений  $\bar{\sigma}_i$ , соответствующих средним значениям каждой из четырех стадий деформирования:  $\bar{\sigma}_1 = 0,09\sigma_{сж}$ ,  $\bar{\sigma}_2 = 0,032\sigma_{сж}$ ,  $\bar{\sigma}_3 = 0,61\sigma_{сж}$ ,  $\bar{\sigma}_4 = 0,88\sigma_{сж}$ .

Были получены АКФ  $B_{x|x}(\tau)$  и ВКФ  $B_{x|y}(\tau)$  принятых сигналов для образцов первой и второй группы, анализ которых показал значительное влияние напряжений на их АКФ и ещё большее на ВКФ. Причём в отличие от  $C_p$ , которое при деформировании образца горной породы существенно изменяется только при совпадении направлений деформирования и УЗ прозвучивания, изменения ВКФ значительны и в случае, когда эти направления ортогональны. Под влиянием напряжений происходит изменение всех информативных параметров УКМ, из которых наибольший интерес (с учетом чувствительности к НДС и простоты

измерения) представляют дисперсия  $B_{y_1/y_2}(0)$  и период  $\tau_0$  АКФ УЗ сигнала, а также коэффициент взаимной корреляции  $\rho_{y_1/y_2}$  двух принятых УЗ сигналов и их интервал корреляции  $\tau_{ик}$ . Экспериментально полученные значения указанных параметров при средних напряжениях  $\bar{\sigma}_i$  каждой стадии деформирования приведены в табл.1.

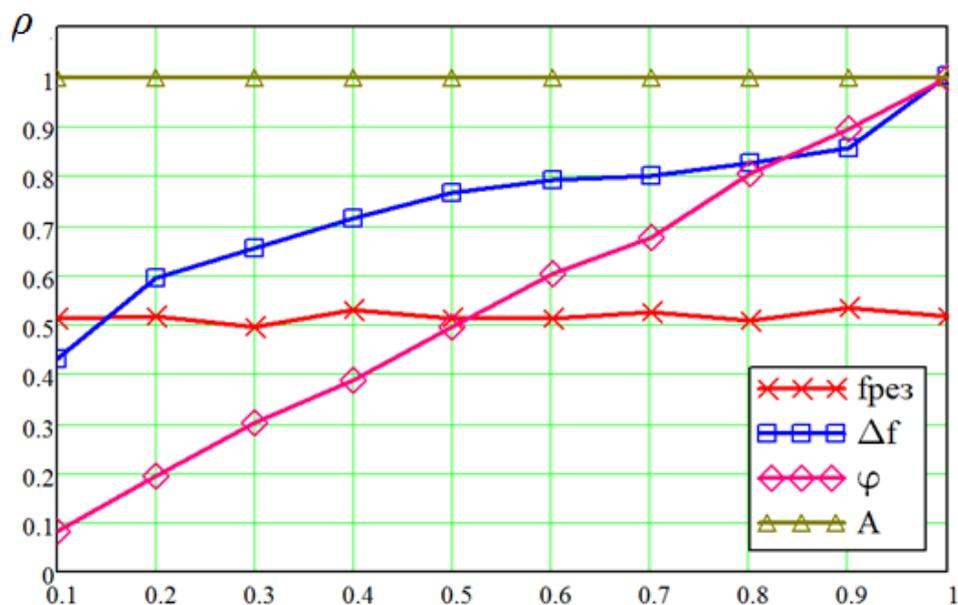
**Таблица 1** - Результаты лабораторных ультразвуковых корреляционных испытаний образцов калийной соли в условиях их одноосного нагружения

Стадии деформирования		Информативные параметры при АКО		Информативные параметры при ВКО	
		$B_{x/x}(0)$ , у.е.	$\tau_0$ , мкс.	$\rho_{y_1/y_2}$	$\tau_{ик}$ , мкс.
I	Начальная	114	2,54	0,65	195
II	Линейно-упругая	147	2,36	0,85	240
III	Упруго-пластичная	171	1,97	0,96	281
IV	Пластическая предельная	57	2,50	0,51	174

Отметим, что при переходе от I стадии деформирования к III, происходит нелинейное, но относительно плавное с постоянным знаком изменение информативных параметров. Переход от III к IV стадии сопровождается резким возрастанием и инверсией знака указанных значений, так как на IV стадии начинаются процессы структурной дезинтеграции геоматериала, оказывающие сильное декоррелирующее влияние на УЗ сигнал.

Для выявления влияния контактных условий (КУ) ПЭП с геосредой на коэффициент взаимной корреляции  $\rho_{y_1/y_2}$  было проведено компьютерное моделирование в соответствии со схемой на рис.2б.

С помощью оператора случайных чисел задавался шумовой сигнал (длительностью 5мс, полосой  $\Delta f^{\text{баз}} = 50\text{кГц}$  и резонансной частотой  $f_{\text{рез}}^{\text{баз}} = 100\text{кГц}$ ), который разделялся на два потока. Один из них принимался за базовый. Другой (контрольный) подвергался фильтрации с управляемыми амплитудой, фазой, нижней и верхней границами полосы частот сигнала. По завершению всех преобразований оба потока поступали на КА, где производилось вычисление коэффициента  $\rho_{y_1/y_2}$ , зависимость которого от относительного изменения амплитудных, частотных и фазовых характеристик контрольного сигнала относительно базового приведена на рис.5. При этом изменялись: резонансная частота  $f_{\text{рез}}^{\text{конт}}$  от 0,1 до 1 в долях от  $f_{\text{рез}}^{\text{баз}}$ ; ширина полосы  $\Delta f^{\text{конт}}$  - в диапазоне (10÷100 %)  $\Delta f^{\text{баз}}$ , фазовый сдвиг  $\varphi$  от 100% совпадения по фазе до 10% перекрытия сигналов, а амплитуда  $A$  от 0,1 до 1  $A_{\text{б}}$  базового значения.

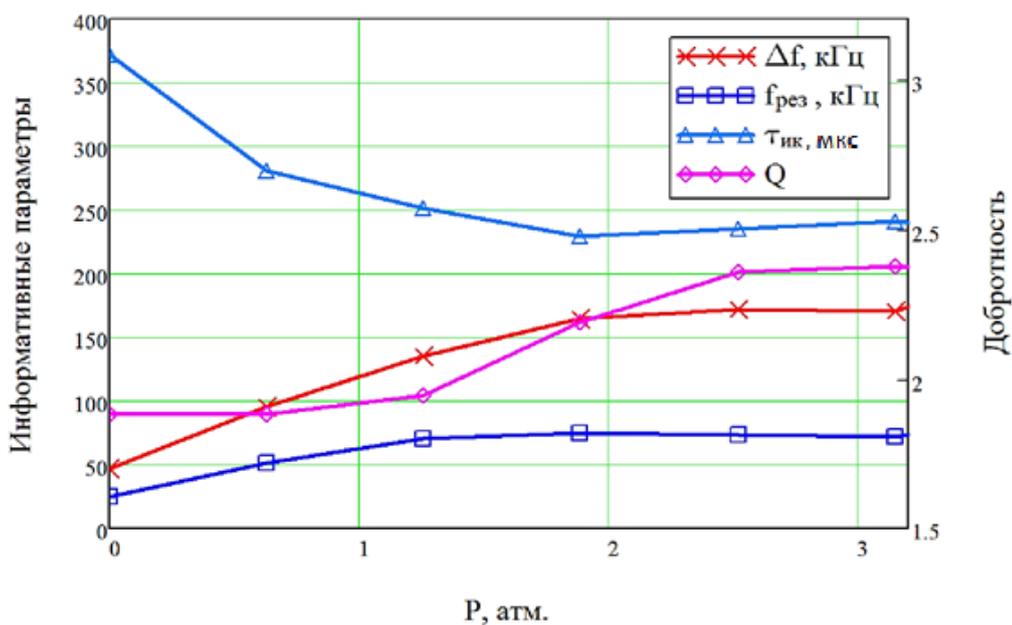


**Рисунок 5** - Зависимость коэффициента  $\rho_{y1/y2}$  от изменения характеристик контрольного сигнала по отношению к характеристикам базового сигнала

Установлено, что наибольшее влияние на величину  $\rho_{y1/y2}$  оказывает изменение ширины полосы частот сигнала, а также разность фаз прихода сигналов на КА. Это принципиально важно, поскольку плохие КУ приводят к некоторому воздушному зазору между ПЭП и геосредой, который действует на сигнал как ФНЧ и временная задержка. В то же время, как следует из приведённых экспериментальных данных, влияние амплитуды на коэффициент  $\rho_{y1/y2}$  отсутствует.

Известно, что при УЗ скважинных измерениях основным способом улучшения КУ ПЭП с массивом является увеличение давления  $P$  их прижима к стенкам скважины. В случае УКМ проблема минимизации влияния КУ на измеряемый коэффициент  $\rho_{y1/y2}$  сводится к задаче поиска критерия того, что достигнуто оптимальное значение  $P$ , начиная с которого изменение указанного влияния на корреляционные характеристики сигналов  $y_1$  и  $y_2$  прекращается. Для выбора такого критерия были проведены лабораторные эксперименты, в ходе которых осуществлялось прозвучивание образца известняка при изменяющейся величине  $P$ . При этом измерялись такие информативные параметры принятого шумового акустического сигнала, как ширина полосы  $\Delta f$  нормированного спектра по уровню 0,7, резонансная частота  $f_{рез}$  и добротность  $Q = f_{рез} / \Delta f$ , а также интервал автокорреляции  $\tau_{ик}$  шумового сигнала.

Как видно из рис. 6 при больших значениях  $P$  происходит выполаживание всех указанных выше параметров. Учитывая, что ультразвуковой шумовой каротаж и прозвучивание в любом случае предполагают корреляционную обработку сигналов, основным информативным параметром качества прижима преобразователей следует использовать величину  $\tau_{ик}$ . При этом в качестве критерия достижения оптимальных контактных условий ПЭП с массивом будет выступать момент достижения давлением  $P$  значения, при котором уже не происходит изменения параметра  $\tau_{ик}$ .



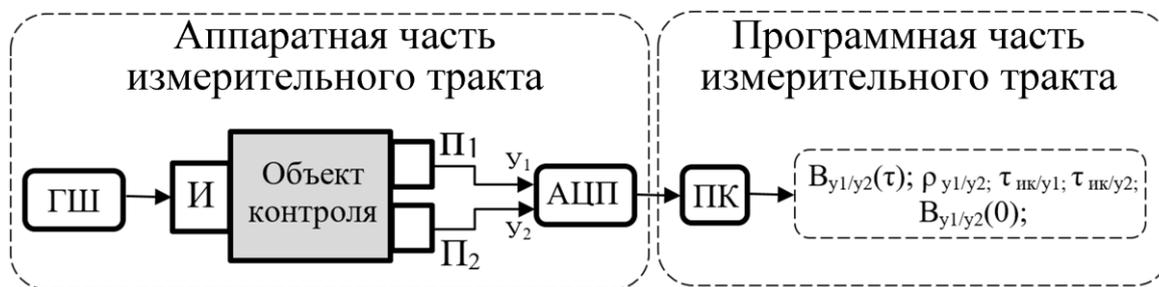
**Рисунок 6** – Зависимости параметров принятого шумового сигнала в функции от давления прижима пьезоэлектрических преобразователей к образцу

**В четвёртой главе** рассмотрены вопросы аппаратурного и методического обеспечения ультразвукового корреляционного метода оценки структурных неоднородностей и НДС массива в окрестностях горных выработок и представлены результаты его натуральных испытаний.

Была разработана аппаратура, состоящая из генератора шума ( $ГШ$ ), скважинного зонда ( $СЗ$ ) с излучающим  $I$  и приёмными  $П_{1,2}$  ПЭП, двухканального аналого-цифрового преобразователя ( $АЦП$ ) и персонального компьютера ( $ПК$ ) для обработки принимаемых сигналов. Показана целесообразность такого построения аппаратуры, при котором одна часть измерительного тракта имеет аппаратную, а другая – программную реализацию (рис. 7).

Разработаны и реализованы схемные решения автономного  $ГШ$ , обеспечивающего генерацию шумового сигнала в полосе 10 – 500 кГц с

регулируемой амплитудой до 100 В, а также модульная конструкция скважинного зонда, позволяющая изменять взаимное расположение излучающего и приёмных ПЭП и количество последних.



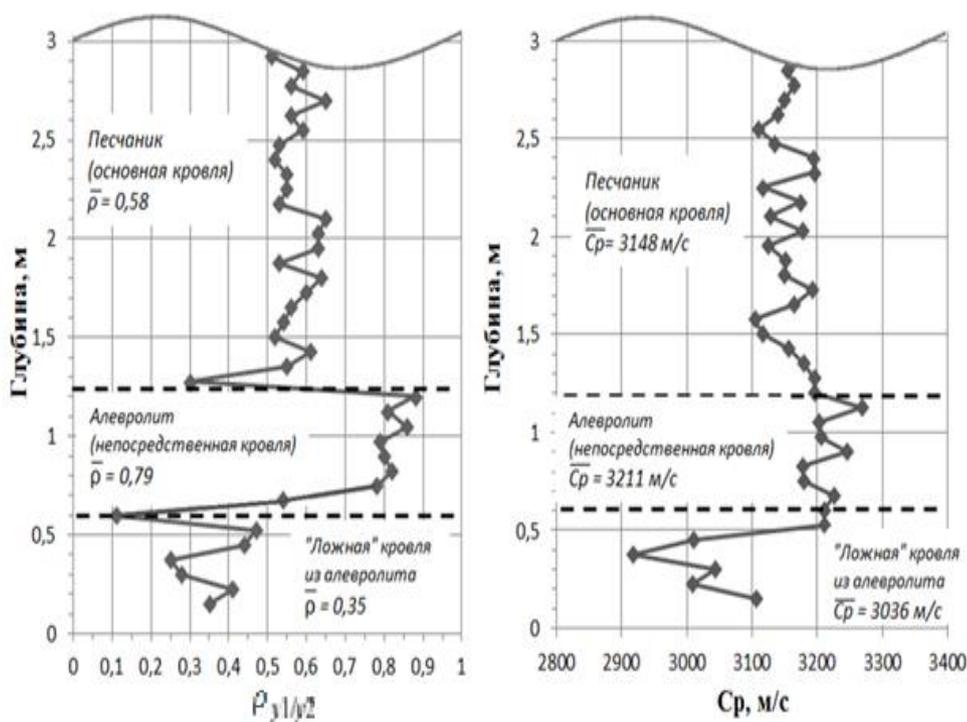
**Рисунок 7** - Измерительный тракт аппаратуры контроля

Были обоснованы ультразвуковые способы структурной диагностики и оценки напряжённо-деформированного массива в окрестностях горных выработок на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки. Их основными отличительными особенностями при каротаже и межскважинном прозвучивании исследуемого участка массива являются: симметричное расположение приёмных ПЭП относительно излучающего на расстоянии, не превышающем 0,3 радиуса корреляции излученного сигнала в ненарушенной горной породе; измерение на каждом контролируемом участке интервалов автокорреляции  $\tau_{ик/y1}$ ,  $\tau_{ик/y2}$  принятых УЗ сигналов при одновременном увеличении силы прижима приёмных ПЭП к стенке скважины до момента, когда изменения  $\tau_{ик/y1}$  и  $\tau_{ик/y2}$  прекращаются; измерение в этот момент коэффициента взаимной корреляции  $\rho_{y1/y2}$  и отношения  $\tau_{ик/y2} / \tau_{ик/y1}$ , которые используют в качестве информативных параметров контроля.

Апробация разработанного УЗ корреляционного метода геоконтроля в природных условиях применительно к решению задачи изучения строения кровли выработки осуществлялась на шахте «Первомайская» АО «Угольная компания «Северный Кузбасс».

Были получены, в частности, представленные на рис.8 зависимости величин  $\rho_{y1/y2}$  и  $C_p$  в функции от глубины каротажных измерений в кровле выработки. Они свидетельствуют о том, что при переходе от «ложной» к непосредственной кровле из алевролита среднее значение  $\bar{\rho}$  возрастает от 0,35 до 0,79, то есть на 125 %. При этом среднее значение  $\bar{C}_p$  возрастает от 3036 м/с до 3211 м/с, то есть всего примерно на 6 %.

При переходе от непосредственной кровли к основной значения  $\bar{\rho}$  и  $\bar{C}_p$  изменяются на 26,6% и примерно 2% соответственно. Таким образом, натурные измерения подтвердили сделанные по результатам моделирования выводы о существенно большей информативности ультразвуковых корреляционных измерений по сравнению с традиционными времяимпульсными.



**Рисунок 8** – Зависимость коэффициента взаимной корреляции  $\rho_{y1/y2}$  принятых сигналов (а) и скорости продольной волны  $C_p$  (б) от глубины скважины в кровле горной выработки

Применительно к задаче контроля пространственного распределения напряжений в целике апробация ультразвукового корреляционного метода осуществлялась на Новомосковском гипсовом руднике. Показано, что положение максимума зоны опорного давления (который находился на глубине  $l \sim 1,7$  м), может быть установлено с использованием как корреляционных, так и времяимпульсных УЗ измерений, то есть по зависимостям  $\rho_{y1/y2}$ ,  $\tau_{ик}$  или  $C_p$  принятых УЗ сигналов в функции от расстояния  $l$  до поверхности целика. В то же время надежность такого установления значительно выше на основе корреляционных информативных параметров, степень различия которых в зонах разгрузки, естественных напряжений и опорного давления существенно больше, чем традиционно используемой скорости распространения продольных упругих волн. Так, на глубинах 2 м и 1 м значение  $C_p$  уменьшалось по сравнению с максимумом

на 6,8 и 21 % соответственно. Уменьшение  $\rho_{y1/y2}$  на глубине 1 м составляло 46 %, а на глубине 2 м – 32 %. Уменьшение величины  $\tau_{ик}$  на глубине 1 м составляло 50 %, а на глубине 2 м – 24 %.

Разработанная в рамках диссертации «Методика структурной диагностики пород кровли горных выработок с использованием ультразвукового корреляционного каротажа» используется ГИ УрО РАН на рудниках ПАО «Уралкалий», а также передана в ГИ КНЦ РАН и ИГД ДВО РАН, которые планируют её использование на горнорудных предприятиях регионов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований влияния структурных неоднородностей и механического нагружения горных пород на корреляционные характеристики распространяющихся в них ультразвуковых шумовых сигналов решена актуальная научная задача обоснования и разработки скважинного ультразвукового корреляционного метода диагностики состояния массива в окрестностях горных выработок, что имеет важное значение для обеспечения эффективности и безопасности горных работ при подземной разработке полезных ископаемых, строительстве и эксплуатации подземных сооружений.

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

1. Показано, что недостатки традиционных ультразвуковых скважинных методов диагностики состояния массива в окрестностях выработок обусловлены использованием импульсных акустических сигналов в качестве зондирующих и скорости их распространения в горных породах в качестве информативного параметра контроля.
2. Проанализированы теоретические предпосылки ультразвуковой диагностики состояния приконтурного массива на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки после прохождения исследуемой области геосреды.
3. На основе компьютерного и физического моделирования установлены закономерности влияния строения, структурных неоднородностей геосреды и её напряжённо-деформированного состояния на корреляционные характеристики шумового непрерывного стационарного сигнала.

4. Обоснованы наиболее эффективные схемы, а также информативные параметры скважинных ультразвуковых корреляционных измерений в приконтурном массиве. Проведена оценка чувствительности этих параметров по отношению к дефектам структуры и изменению напряжённого состояния горных пород.
5. Предложено качественное объяснение установленной ранее экспериментально возможности прозвучивания ультразвуковыми шумовыми сигналами более значительных баз геоматериала, чем импульсными,
6. Обоснованы принципы аппаратного обеспечения ультразвукового корреляционного метода геоконтроля, с учётом которых реализован аппаратно-программный комплекс такого обеспечения.
7. Обоснованы способы ультразвукового корреляционного каротажа и межскважинного прозвучивания приконтурного массива, обеспечивающие высокую точность и надёжность выявления в нём структурных неоднородностей, а также минимизацию помехового влияния на результаты диагностики НДС различий в базах контроля и контактных условиях преобразователей с геосредой в двух акустических измерительных каналах.
8. Проведены натурные испытания скважинного ультразвукового корреляционного метода геоконтроля в шахтных условиях, подтвердившие его высокую эффективность при оценке структурной неоднородности и пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве.
9. В рамках диссертационной работы разработана «Методика структурной диагностики массива в окрестностях горных выработок на основе ультразвуковых каротажных измерений с использованием шумовых сигналов и их корреляционной обработки», которая передана для практического использования ряду научных институтов, занимающихся проблемами геоконтроля.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. О принципах ультразвуковой структурной диагностики приконтурного массива с использованием шумовых зондирующих сигналов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2015. - №1. - С. 53 - 62.
2. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., 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.

3. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Kormnov A.A. Characteristics instrumental support of structural heterogeneity control around mining using noise probing signals// Report of the XXIII international scientific symposium «Miner's week – 2015». - Сб. научн. тр. // М.: Издательский дом «МИСиС». - 2015. - С. 60 - 65.
4. Шкурятник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Оценка чувствительности метода ультразвукового корреляционного каротажа при выявлении трещин в кровле горных выработок // Горный журнал.- 2016. - №1. - С.54-57.
5. Шкурятник В.Л., Николенко П.В., 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.
6. Кормнов А.А., Николенко П.В., Шкурятник В.Л. Минимизация влияния контактных условий акустических преобразователей с массивом при реализации ультразвукового корреляционного метода контроля. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2016. СВ №1. - С. 43-52.
7. 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.
8. Шкурятник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Новые акустические методы оценки структурной поврежденности и напряженно-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработок // Тезисы докладов X Международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Апатиты: ГОИ КНЦ РАН.14-17 июня 2016 г.- С.30-31.
9. Николенко П.В., Кормнов А.А., Шкурятник В.Л. Способ акустического каротажа. Патент 2579820 РФ. - Бюл. изобр. -2016.- №10.
10. Николенко П.В., Кормнов А.А., Шкурятник В.Л. Способ контроля напряженного состояния массива горных пород в окрестности выработки. Патент 2618778 РФ. - Бюл. изобр. -2017.- №14.