

На правах рукописи

МАНАКОВ Сергей Александрович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД
МЕТОДАМИ КОГЕРЕНТНОЙ АКУСТИКИ**

01.04.06 – акустика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель:

Лебедев Андрей Вадимович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Официальные оппоненты:

Максимов Герман Адольфович, доктор физико-математических наук, Открытое акционерное общество «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева» (г. Москва);

Разин Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники» (АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ, г. Москва).

Защита диссертации состоится «27» февраля 2017 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «__» января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А.И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Структурно неоднородные среды представляют собой широкий класс материалов природного и искусственного происхождения. Они характеризуются наличием широкого спектра пространственных масштабов, что отличает их от микроскопически однородных (например, кристаллических) материалов. Сложная структура приводит к появлению необычных акустических свойств, в первую очередь нелинейных [1–4]. Среди пространственных масштабов выделяются микроскопические, отвечающие взаимодействиям на атомарном уровне, мезоскопические $\sim 10^{-6}$ м, связанные с пространством между зернами, шириной трещин и т.п. структурных элементов, и, наконец, макроскопические масштабы, существенно превышающие размеры зерен $\sim 10^{-4}$ м и отвечающие размерам исследуемых образцов материала 10^{-1} м. Примером структурно неоднородных сред с широким спектром пространственных масштабов являются горные породы.

Существует множество методов исследования акустических характеристик материалов. Среди них наибольшее распространение получили импульсные методы локации, имеющие простую физическую интерпретацию [5]. Однако при всех достоинствах и физической прозрачности этих методов их точность невелика, и они непригодны для исследования тонких эффектов микроструктуры и малых изменений параметров, чему посвящена диссертация. Наиболее точными методами являются методы когерентной акустики, допускающие интерферометрические или фазовые измерения. К таким методам относятся и резонансные, которые использованы в лабораторных исследованиях. В натуральных экспериментах, рассмотренных в диссертации, речь также идет о малых изменениях параметров, и для разрешения подобных изменений использование развитых методов когерентной сейсмоакустики принципиально важно. Таким образом, методы когерентной акустики составляют методологическую основу всего исследования.

Свойства горных пород определяются не столько их составом, сколько особенностями устройства внутренних связей между составляющими их кристаллитами. Таким образом, особенности взаимодействий на мезоскопических масштабах явным образом проявляются в макроскопическом акустическом отклике, что позволяет судить о мезоскопической структуре гетерогенной среды по ее макроскопическому отклику. Учитывая наличие пор и полостей внутри горных пород, можно предположить существенное влияние жидкости на акустический отклик, что обуславливает важность исследования эффектов насыщения, которым посвящена существенная часть представленного исследования.

Говоря об акустике пористых сред, насыщенных жидкостью, нельзя не упомянуть работы Френкеля, Био и многих других. История исследований в этой области насчитывает уже 60 лет, начиная со ставшей классической рабо-

ты Био [6]. В модели Био взаимодействия между флюидом и скелетом происходит только за счет вязкого трения в жидкости. Во многих случаях это приближение является удовлетворительным и имеется немало работ, где теория получила экспериментальное подтверждение. В модели Био модуль сдвига горной породы полагается неизменным. Однако неизменность модуля сдвига при насыщении жидкостью горных пород представляет собой скорее исключительный случай.

Следует указать на недостатки известных данных. Так, например, в работе Мерфи [7], исследования влияния насыщенности на скорости продольных и поперечных волн выполнены на различных образцах с использованием различных методов экспериментальных исследований. С учетом имеющегося разброса параметров природных сред сравнение акустических характеристик, связанных с объемными и сдвиговыми деформациями, становится затруднительным.

В течение долгого времени велись и продолжают вестись дискуссии об обоснованности использования теории Био для описания поглощения в донных отложениях. Существуют два полярных мнения [8,9], подкрепленных экспериментальными данными, согласно которым дисперсия звука в донных отложениях отсутствует (см. обзор [8]), или, наоборот, имеется и удовлетворительно описывается теорией Био (обзор, [9]). Несмотря на долгую историю вопроса, до настоящего времени окончательный ответ не найден и предлагаются различные варианты объяснения. Проведенные автором диссертации экспериментальные исследования, по-видимому, дают ответ на вопрос, почему в одних случаях верна точка зрения [8], в других – точка зрения [9].

Как отмечено в [1], необычные свойства структурно-неоднородных материалов открывает возможности для нелинейной акустической диагностики. В качестве примера такой диагностики с оценкой объемной концентрации дефектов можно указать работу [2*]. Среди необычных акустических свойств структурно-неоднородных материалов с широким спектром пространственных масштабов следует отметить переход от классической нелинейности, аналогичной ангармонизму кристаллической решетки [10], к нелинейности гистерезисного типа при превышении определенного порога деформации [11]. Этот порог также отвечает по порядку величины уровню деформаций, начиная с которого появляются эффекты медленной релаксации (последствия) с характерной логарифмической зависимостью упругих параметров от времени [12].

В монографии [2] явление нелинейного гистерезиса связывается с наличием элементов, взаимодействующих через силы Ван-дер-Ваальса (силы адгезии). В работе [13] показано, каким образом происходит переход от классической нелинейности к нелинейному гистерезису. Там же показано, что пороговое значение уровня деформации, отвечающее этому переходу, совпадает с уровнем деформации, начиная с которого наблюдаются эффекты медленной релаксации. Важно отметить, что наличие жидкости из-за ее влияния на ко-

Эффект адгезии должен проявиться в особенностях перехода к гистерезисной нелинейности и характеристиках медленной релаксации. Подобные экспериментальные исследования не проводились, и поэтому данному вопросу уделено внимание в диссертации. Так же следует отметить, что в подавляющем большинстве работ, связанных с экспериментальными исследованиями по указанной тематике, анализируется только реакция на деформации с изменением объема. Исследования, представленные в диссертации, выполнены также для деформаций чистого сдвига, что способствовало лучшему пониманию процессов, лежащих в основе гистерезисной нелинейности и медленной релаксации.

Горные породы можно разделить на два класса: консолидированные и неконсолидированные. В первом случае связь между зернами обеспечивается силами адгезии за счет наличия цементирующих веществ между зернами, и для их разрушения необходимо приложить значительное усилие. Структура же неконсолидированных сред сохраняется за счет внешнего давления, и при его исчезновении среда из гранул рассыпается на составляющие, что проявляется в необычном поведении. В качестве примеров можно привести следующие явления: передача внешней силы через цепочки сил [14], сегрегация гранул по размерам под действием вибраций [15], сильная зависимость макроскопических модулей упругости упаковки зерен от давления поджатия [16], динамическое изменение нелинейных акустических свойств [17]. Отсутствие исчерпывающих моделей указанных явлений обуславливает важность развития экспериментальных методов исследования, что составило существенную часть работы соискателя. При этом стало возможным выделить отмеченную выше роль сил адгезии и определить особенности практически неисследованной медленной релаксации в неконсолидированных горных породах.

Проведенный анализ литературы показал, что недостатка в теоретических, модельных соображениях нет. Значительно хуже дело обстоит с экспериментальными данными. Поэтому исследования, составившие основу диссертации, были направлены в первую очередь на получение экспериментальных данных такого качества, которое значительно ограничивает свободу последующей интерпретации и способствует построению наиболее адекватных эксперименту теоретических моделей. Отметим, что для этого был проведен стандартный геологический анализ исследуемого в диссертации образца горной породы. В результате, в отличие от множества работ, известных из литературы, имелась информация о внутренней структуре материала, о распределении зерен по размерам, химическому составу материала. Все это позволило выполнить оценки, согласующиеся с акустическими данными и подтверждающие правильность предложенных механизмов взаимодействия жидкости со скелетом.

Для исследования консолидированных материалов был выбран метод резонансной акустической спектроскопии гетерогенных сред, позволяющий с высокой точностью измерять одновременно все компоненты тензора упруго-

сти на одном образце без изменения его свойств, что имело бы место при использовании клеевого контакта акустических преобразователей с образцом [18]. Для измерений акустических свойств неконсолидированных сред была разработана и создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования в широком диапазоне деформаций [4*]. Особенностью этой установки является возможность исследования отклика гранулированного сыпучего материала на динамический сдвиг и изменение объема. При этом в силу конструктивных особенностей установки деформация сдвига и расширения-сжатия являются однородными.

Наибольший интерес, в том числе, и с точки зрения практического использования в дистанционной диагностике состояния природных сред, представляет развитие методов дистанционного определения акустических характеристик. Дистанционные методы позволяют исследовать свойства природных сред в условиях их естественного существования. Как отмечено в [19], при решении задач инженерной сейсмоакустики существенно возрастает роль комплексных исследований в лабораторных и натуральных условиях. В этом случае, например, результаты, полученные в лабораторных условиях, являются основой для разработки дистанционных акустических методов контроля насыщенности грунта. Контроль насыщенности грунта представляет интерес, в том числе, с точки зрения дистанционного исследования процессов фильтрации жидкости в пористой среде. Работа была направлена на развитие прецизионных дистанционных методов измерения скоростей распространения упругих волн. Предложенные методы основаны на использовании когерентности зондирующих сигналов и представлены в работах [5*,6*,7*,8*]. Насколько можно судить по литературе, удалось впервые реализовать фазовые методы межскважинного сейсмоакустического профилирования (определения скоростного разреза) на объемных SH-волнах в условиях низкого контраста акустических параметров слоистой среды. Установленный в Главе 1 характер изменения акустических характеристик указывает на возможность дистанционной оценки насыщенности грунта, что было подтверждено результатами натурального эксперимента с изменением насыщенности.

Цель работ

Диссертационная работа посвящена исследованию линейных и нелинейных акустических свойств структурно-неоднородных сред в лабораторных и натуральных условиях в целях развития методов дистанционных исследований. В рамках указанной общей цели решались следующие конкретные задачи:

1. Экспериментальное исследование механоакустических свойств пористых горных пород в зависимости от насыщения жидкостью - модулей упругости и коэффициентов потерь при различных амплитудах возбуждения, а также эффектов медленной динамики. Выделение и интерпретация особенностей, связанных с объемными и сдвиговыми деформациями.

2. Разработка метода и создание экспериментальной установки для измерения акустических характеристик неконсолидированных материалов с по-

следующим исследованием этих характеристик в условиях, моделирующих природные.

3. Разработка фазовых методов когерентной сейсмоакустики в целях диагностики состояния и исследования свойств дисперсных грунтов в натуральных условиях.

Научная обоснованность и достоверность результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проверочными численными экспериментами, теоретическими расчётами и сравнение с данными, полученными в работах других авторов.

Научная новизна

1. С помощью метода резонансной акустической спектроскопии впервые проведено исследование линейных и нелинейных характеристик консолидированной горной породы в зависимости от степени заполнения пор жидкостью. Полученный объем данных позволил уточнить результаты предшествующих исследований и обнаружить ранее неизвестные свойства, в частности, зависящий от насыщенности скачкообразный переход от классической к гистерезисной нелинейности и появление частотной дисперсии коэффициента поглощения при высокой степени насыщения.

2. Предложен и экспериментально апробирован новый метод измерений механоакустических свойств неконсолидированных сред, имеющий преимущества по сравнению с известными. На его основе проведены исследования модельных гранулированных сред и обнаружены неизвестные ранее зависимости, связанные с конечными амплитудами деформаций.

3. Предложены и апробированы новые методы когерентной сейсмоакустики, основанные на фазовых измерениях. Экспериментально показана возможность разрешения слоев со слабым (до единиц процентов) контрастом геоакустических параметров.

Практическая значимость

Информация, полученная при исследовании карбонатной горной породы, может быть использована в сейсморазведке для интерпретации полученных распределений скоростей упругих волн в резервуарах. Результаты измерений нелинейных характеристик могут способствовать совершенствованию методов нелинейной диагностики.

Предложенный метод измерений механических свойств сыпучих сред может быть использован для исследования различных явлений, наблюдаемых в гранулированных средах: динамическая устойчивость грунта, влияние вибрации на просачивание жидкости сквозь пористый материал, влияние состава грунта на модули упругости и коэффициенты потерь и др.

В процессе выполнения работы были разработаны два метода дистанционной диагностики состояния грунта в натуральных условиях. Первый основан на межскважинном профилировании на SH-волнах с использованием когерентного излучателя; второй – используется анализ фазовой скорости и отношения проекций смещения в волне Рэлея. Эти методы открывают новые

возможности для мониторинга и диагностики природных сред в условиях их естественного залегания.

Полученные результаты были использованы при выполнении исследовательских проектов по грантам РФФИ, по программам фундаментальных исследований ОФН РАН «Когерентные акустические поля и сигналы» и «Фундаментальные основы акустической диагностики природных и искусственных сред».

Положения, выносимые на защиту

1. Проведенные исследования эффектов влагонасыщенности на линейные и нелинейные акустические характеристики природных пористых сред позволили дать объяснение их поведения, получить неизвестные ранее зависимости и дать физическое объяснение имеющихся в литературе разногласий по поводу механизмов затухания звука в морском дне.

2. Новый метод диагностики механоакустических свойств неконсолидированных сред, основанный на измерении относительного изменения резонансных частот колебаний контейнера, заполненного сыпучим материалом, позволяет проводить прецизионное исследование линейных и нелинейных акустических характеристик таких материалов.

3. Предложенные новые фазовые методы когерентной сейсмоакустики позволяют проводить диагностику структуры земных структур при слабой изменчивости геофизических параметров приповерхностных слоев на уровне до единиц процентов.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы представлены в 25 публикациях (из них 8 статей в реферируемых изданиях и 17 докладов и тезисов докладов). Результаты диссертации были представлены на конференциях: XII научная конференция по радиофизике (Нижний Новгород, 2008); XIII научная конференция по радиофизике (Нижний Новгород, 2009); XVI международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2010); XX сессия РАО (Москва, 2008) XXIV сессия РАО (Саратов, 2011); XV научная конференция по радиофизике (Нижний Новгород, 2011); XVI научная конференция по радиофизике (Нижний Новгород, 2012); 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Париж, Франция, 2012); XXV сессия РАО (Москва, 2012); 1-я Всероссийская акустическая конференция (Москва, 2014); научно-техническая конференция «Сейсмические технологии–2015» (Москва, 2015); TECNACUSTICA 2013 (Валладолид, Испания, 2013); 160th Acoustical Society of America Meeting (Канкун, Мексика, 2010); Forum Asusticum (Краков, Польша, 2014).

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Манаков С.А. участвовал в создании экспериментальной установки по измерению акустических свойств сыпучих

сред. Совместно с Коньковым А.И. разработал новый метод дистанционного измерения скоростей упругих волн приповерхностных слоев на основе анализа характеристик волны Рэлея. Манаковым С.А. были предложены и реализованы протоколы измерений и обработки экспериментальных данных. Манаков С.А. участвовал в подготовке докладов для конференций и написании статей.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Общий объем работы – 136 страниц, включая 31 рисунок и список литературы из 133 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновываются актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

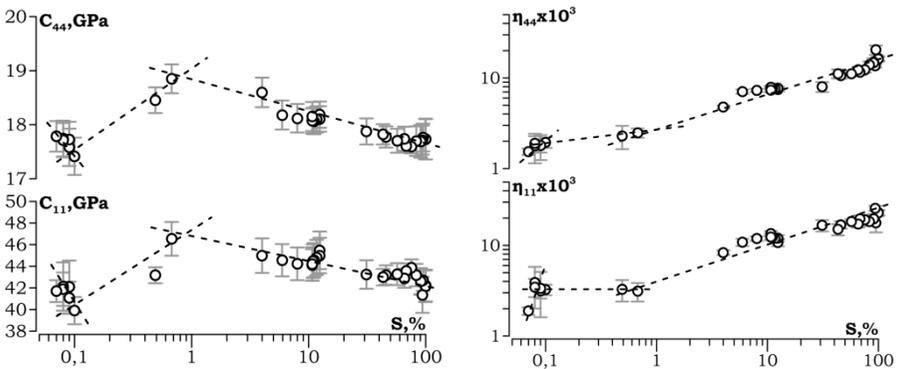


Рис. 1. Зависимости модулей упругости C_{ij} , и соответствующих коэффициентов потерь η_{ij} , от степени насыщения порового пространства образца водой

В **первой главе** диссертации представлены результаты исследований образца карбонатной горной породы в зависимости от степени насыщения пор жидкостью методами линейной и нелинейной акустической спектроскопии. Все эксперименты проводились для одного и того же образца.

В §1.1 отражена информация о методике эксперимента. Кратко описан метод резонансной спектроскопии, его преимущества и недостатки. Особенностью используемой экспериментальной установки являются конструкция пьезокерамических преобразователей, возбуждающих и измеряющих колебания образца. Здесь же рассмотрены особенности реализации метода резонансной акустической спектроскопии при конечных амплитудах деформаций.

В §1.2 приводится описание образца: его размеры, плотность, химический, минералогический и гранулометрический состав. Образец представляет собой светло-серый сильно пористый известковый доломит.

В §1.3 представлены и обсуждаются результаты измерения линейных тензоров упругости и коэффициентов потерь в зависимости от степени насыщения пор образца карбонатной горной породы водой. На рис. 1. показаны зависимости модулей упругости C_{ij} , и соответствующих коэффициентов потерь η_{ij} , от степени насыщения. Можно выделить три этапа изменения

акустических свойств образца: (1) на начальном участке модули упругости уменьшаются, а потери резко возрастают; (2) Затем жесткость образца увеличивается и при 1% наблюдается максимум; (3) дальнейшее увеличения количества жидкости приводит к плавному уменьшению модулей упругости и плавному росту потерь. Этап 1 можно определить, как этап конденсации влаги на стенках пор и образование мономолекулярного слоя жидкости, что приводит к уменьшению силы когезии. Этап 2 связан с формированием менисков в местах контакта зёрен и возникновением капиллярных сил поджатия зёрен. И, наконец, этап 3 можно определить, как этап постепенного заполнения всего пространства пор жидкостью, что приводит к уменьшению вклада капиллярных сил.

Только при полном насыщении водой для величины η_{44} прослеживается зависимость от частоты $\sim \omega^{0,36 \pm 0,2}$ (рис. 2). Внутренние пустоты образца можно разделить на длинные узкие поры (для которых частота Био ~ 240 кГц) и большие полости, которые при насыщении последними заполняются последними. Поскольку полости имеют большой размер, то существенными оказываются потери колебательной энергии в слое жидкости, контактирующей со стенками пор. В этом случае величины η_{ij} должны иметь корневую зависимость от частоты. Таким образом, только при насыщениях, близких к полному, появляется частотная зависимость коэффициентов потерь. Предложенная модель может быть использована для объяснения расхождения в интерпретации представленных в литературе данных по затуханию в донных осадочных породах [8,9].

В §1.4 представлены результаты исследования нелинейного резонансного отклика образца карбонатной горной породы на двух модах колебаний (первая продольная и вторая крутильная) и при трех степенях насыщения жидкостью порового пространства. На рис. 3 представлены зависимости относи-

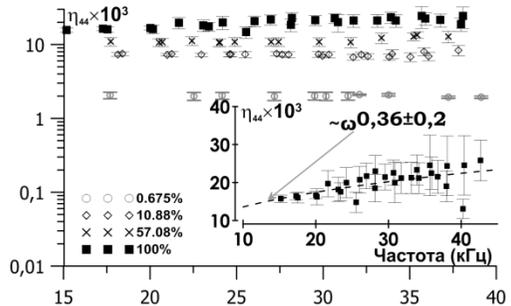


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента потерь η_{44} при разных степенях насыщения

тельного изменения резонансных частот и коэффициентов потерь (величина обратная добротности). При малых амплитудах деформаций форма резонансной кривой совпадает с кривой Лоренца. По мере увеличения амплитуды деформации отчетливо прослеживается деформация резонансной кривой, аналогично тому, что предсказывает теория Ландау нелинейного осциллятора [20]. В этом случае сдвиг частоты пропорционален квадрату амплитуды. При дальнейшем увеличении амплитуды деформаций наблюдается качественное изменение режима колебаний: появляется два локальных максимума. Первый из них отвечает «следу» зависимости резонансной частоты от амплитуды в модели нелинейного осциллятора Ландау. Второй – по-видимому, связан с переходом к гистерезисной зависимости частоты от амплитуды. При дальнейшем увеличении амплитуды первый из максимумов уменьшается и становится неразличимым на фоне второго, а амплитудная зависимость частоты второго становится линейной, что характерно для нелинейного гистерезиса [2].

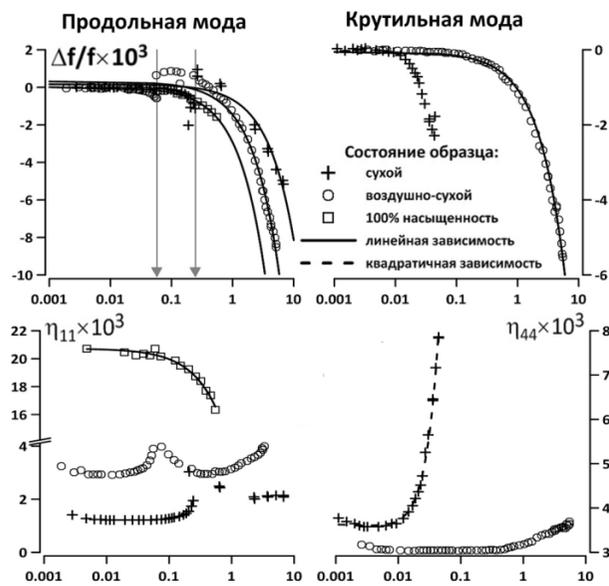


Рис. 3. Зависимости относительного изменения резонансных частот от амплитуды деформаций (вверху) и зависимость коэффициентов потерь (внизу). По оси абсцисс отложены деформации в единицах 10^{-6} . Относительное изменение частоты умножено на 1000

С увеличением содержания воды в поровом пространстве переход от «классической» нелинейности к гистерезисной смещается в область меньших амплитуд. Наличие жидкости приводит к уменьшению коэффициента адгезии, и, соответственно, прочности связей между зёрнами, что обязательно проявится в уменьшении порога деформации, при котором наблюдается переход. При этом гистерезис, связанный с отрывом и восстановлением микроскопических

контактов, должен проявиться в наибольшей степени для объёмных деформаций, что и видно на рис. 3. Увеличение резонансной частоты продольных колебаний при переходе к режиму с предполагаемым отрывом контактов может быть качественно объяснено тем, что динамический коэффициент адгезии

существенно превышает коэффициент адгезии при плавном разъединении поверхностей. Это увеличение обусловлено затратами энергии на диссипативные процессы.

Представленные на рис. 3 зависимости коэффициента поглощения имеют аномалии в области тех же амплитуд деформации, что и аномалии для резонансных частот. При этом наличие немонотонной зависимости согласуется с высказанным выше предположением о роли диссипативных процессов при переходе от режима деформаций с ангармонизмом к режиму деформаций с гистерезисом.

В §1.5 представлены результаты исследования медленной релаксации остаточных деформаций. Были рассмотрены следующие варианты: (1) релаксация резонансных частот продольной и крутильной мод после длительного воздействия на резонансе продольной моды, и (2) релаксация тех же резонансных частот после длительного воздействия на резонансе крутильной моды (рис. 4). Измерения зависимости частот от времени проводились с использованием минимально возможных амплитуд деформаций ($\sim 10^{-9}$).

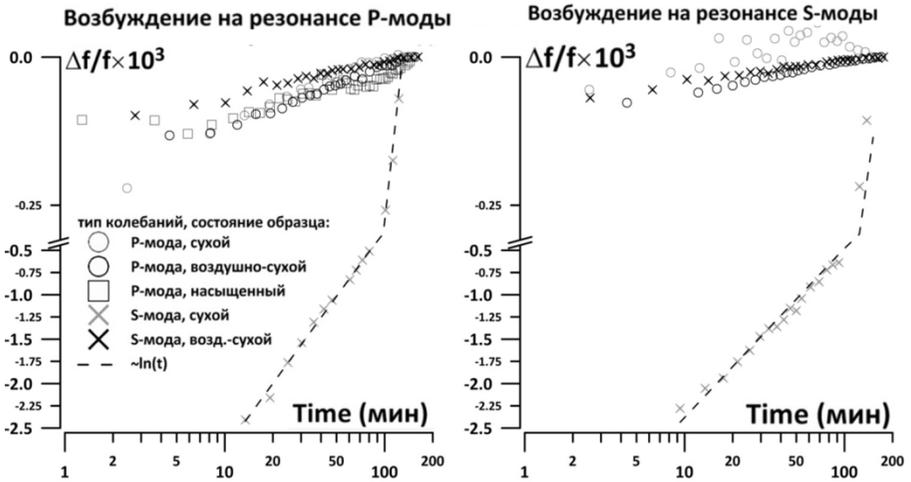


Рис. 4. Медленная релаксация в образце карбонатной горной породы. Слева релаксация после длительного воздействия на резонансе продольной моды, справа – после длительного воздействия на резонансе крутильной моды

В работе [13] совместное проявление гистерезисной нелинейности и медленной релаксации получило следующее объяснение. Медленная релаксация связана с существованием метастабильного состояния в потенциале взаимодействия контактирующих тел (зерен), в которое переходит часть контактов, оторвавшихся в результате интенсивных деформаций. Сам отрыв имеет место для режима деформаций с гистерезисом. Процессу релаксации можно поставить в соответствие пространственный масштаб d [13]. Полученные в данной работе величины d для исследуемого образца в целом ничем не выделяются

по сравнению с величинами d , отвечающими экспериментальным данным других исследователей и имеют значения $\approx 1-4$ нм. Этот масштаб имеет порядок расстояния действия сил Ван-дер-Ваальса, что дополнительно указывает на общность процессов гистерезиса адгезии и медленной релаксации в структурно-неоднородных средах [13].

В §1.6 приводится заключение к первой главе.

Основные результаты первой главы изложены в статьях [1*, 2*, 3*].

Во **второй главе** диссертации описан новый метод измерения акустических свойств сыпучих материалов и результаты исследования с его помощью модельных гранулированных сред.



Рис. 5. Зависимость нормированных сдвигов резонансных частот мод кручения и сжатия от амплитуды деформации на резонансной частоте. Сплошные линии отвечают линейным зависимостям $\propto \beta\epsilon$

отклика контейнера, содержащего исследуемое вещество. Сами измерения становятся разностными, т.е. материальные параметры сыпучей среды определяются разностью резонансных частот и добротности колебаний заполненного и пустого контейнеров.

Важно отметить, что созданная экспериментальная установка позволяет измерить отклик дисперсных сред, как на динамический сдвиг, так и на динамическое изменение объема. Предложенная схема измерений позволяет работать при изменении деформаций в широких пределах, отвечающих $\sim 10^{-9}-10^{-4}$. Резонансные частоты 100–200 Гц близки к частотам природных сейсмоакустических измерений, что позволяет использовать полученные результаты для интерпретации данных природных измерений и развития новых схем дистанционной диагностики.

В §2.1 отражена информация о новом методе измерения неконсолидированных материалов и описана разработанная на его основе экспериментальная установка. Неконсолидированный материал засыпался в контейнер из полистирола. Один из концов контейнера (верхний) соединен с неподвижным массивным элементом. К другому концу (нижнему) крепится подвижный элемент инерции, на котором размещены акселерометры и электромагниты возбуждающей системы. Помимо поля тяжести земли на гранулированную среду действовало внешнее давление, которое передавалось через поршень. Акустические свойства неконсолидированных материалов определяются на основе анализа резонансного

В §2.2 приводится описание модельных гранулированных сред, механико-акустические свойства которых определялись новым методом описанным выше. В работе рассматривались случайные упаковки стеклянных микросфер (размер варьируется от 200 мкм до 450 мкм) и частиц электрокорунда марки 24А-85Ф (среднее значение и дисперсия составляют соответственно 200 и 40 мкм). Данные материалы моделируют природные среды с гладкими и шероховатыми частицами. Размер зерен в обоих случаях удовлетворяют критерию перехода к эффективной безграничной однородной гранулированной среде [21].

В §2.3 представлены результаты измерения модулей упругости гранулированных сред от давления поджатия. В случае случайной упаковки стеклянных шаров модуль всестороннего сжатия K и модуль сдвига G имеют зависимость от давления p : $C(p + p_0)^{1/3}$, где C и p_0 – коэффициенты регрессии, связанные с жесткостью упаковки и начальной величиной сжимающего давления. Данная зависимость хорошо согласуется с теорией Герца–Миндлина [22]. Для упаковки зерен электрокорунда модули упругости K и G увеличиваются линейно с ростом давления. Данная тенденция объясняется особенностью контакта двух зерен – контакт двух шероховатых поверхностей [4*].

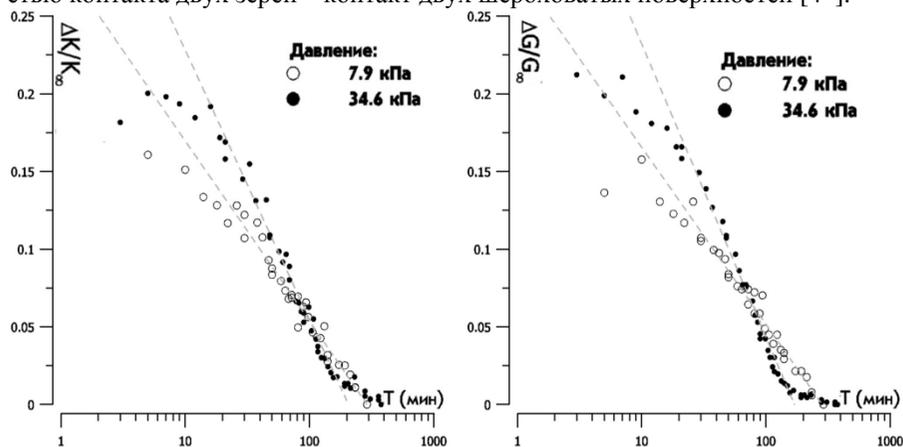


Рис. 6. Наблюдение медленной релаксации в упаковке стеклянных шаров при двух значениях давления сжатия упаковки. Пунктирными линиями показаны регрессионные зависимости, отвечающие логарифму времени

В §2.3 представлены результаты наблюдения нелинейных эффектов и релаксации в гранулированной среде. На рис. 5 приведены измеренные зависимости нормированных сдвигов частот продольного и крутильного резонанса от амплитуды деформаций. В области умеренных конечных динамических деформаций наблюдаются линейные зависимости частот от амплитуды, что характерно для уравнений состояния напряжение–деформация с нелинейным гистерезисом [2] (сплошные линии на рис. 5). И, наконец, дальнейшее увели-

чение уровня деформаций приводит к появлению зависимостей вида « $1/\epsilon$ ». Переход к режиму « $1/\epsilon$ » зависимости резонансных частот от амплитуды деформации можно рассматривать как динамическое «разжижение», когда по мере увеличения амплитуды деформации все меньшая часть гранул остается связанной с колебаниями контейнера [23].

На рис. 6 представлены данные по медленной релаксации модулей упругости в упаковке стеклянных шариков при двух значениях статического давления после интенсивного вибрационного воздействия (амплитуда деформаций $\sim 10^{-6}$ в течение 30 минут). Видно, что модули объемной жесткости и сдвига при релаксации изменяются пропорционально логарифму времени в некотором диапазоне изменения t . При этом наклон зависимостей одинаков, что указывает на источник процесса медленной релаксации в области контакта гранул. Измерение проводилось с минимальными амплитудами возбуждения (деформация $\sim 10^{-7}-10^{-8}$). Уменьшение жесткости связано с разрушением внутренней структуры связей между зернами.

В §2.5 приводится заключение ко второй главе.

Основные результаты второй главы изложены в статье [4*].

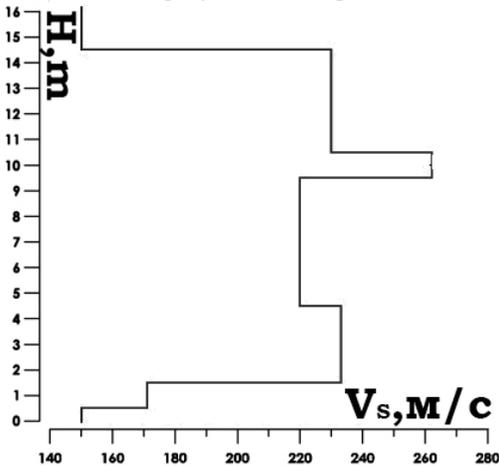


Рис. 7. Восстановленный профиль скорости волны сдвига

же стабильность излучаемого сигнала дала возможность осуществить фазовые измерения. В свою очередь, анализ фазы принимаемого сигнала позволил измерить скорость сдвиговых волн с высокой точностью и разрешить слабоконтрастные слои.

Использование скважинного излучателя позволяет проводить анализ прямых волн и отстроиться от приповерхностного слоя почвы, для которого характерна сильная неоднородность и, как следствие, высокое затухание. Анализ прямых волн заметно упрощает реконструкцию параметров исследуемого

В **третьей главе** представлены результаты сейсмоакустических измерений скоростей упругих волн в дисперсном грунте в натуральных.

В §3.1 представлены результаты межскважинного профилирования на SH-волнах с использованием когерентного излучателя разработанного в ИПФ РАН [24]. Высокая когерентность излучения позволила провести длительное накопление сигнала, повысив отношение сигнал-шум, и синтезировать антенну, используя один векторный геофон. Так

дуемой среды, поскольку сводится к решению томографической задачи, которая и была реализована в фазовых измерениях.

Результат реконструкции профиля волны сдвига представлен на рис. 7. Расположение границ слоев полученных акустическим методом и по результатам бурения скважины под воду на расстоянии 500 метров от места проведения эксперимента находятся в хорошем согласии. Отличие глубин залегания границ слоев составляет около 1 метра

В параграфе §3.2 представлены результаты профилирования на основе анализа кинематических и амплитудных характеристик волны Рэлея. Метод разрабатывался совместно с А.И.Коньковым [25]. Анализ дисперсионных свойств волны Рэлея имеет много общего с методом фазового межскважинного сейсмоакустического профилирования на когерентных SH-волнах. Точно также анализируется прямая волна, распространяющаяся источника к приемнику, и ее фазочастотная характеристика. Отличием от межскважинного профилирования является тип волны и способ получения информации об изменении акустических характеристик с глубиной. В случае поверхностной волны информация о стратификации акустических параметров связана с зависимостью эффективной глубины проникновения волны от частоты. Поверхностная волна Рэлея является неоднородной и ее амплитуда экспоненциально затухает по мере увеличения глубины. Следовательно, меняя частоту волны Рэлея, можно изменять глубину ее проникновения и тем самым определять зависимость параметров среды, в которой распространяется волна, от глубины.

На этом факте основаны методы SASW/MASW, в которых анализируется только фазовая скорость [26]. Особенностью методов является задание априорной информации об отношении скоростей объемных волн или, что эквивалентно, о величине коэффициента Пуассона. Для отказа от этой априорной информации было предложено рассматривать помимо фазовой скорости и частотную зависимость отношение проекций вектора смещения свободной поверхности в волне Рэлея.

На рис. 8 представлены результаты реконструкции параметров среды в случаях сухого и влажного грунта (измерения проводились летом и осенью на одной и той же площадке). Сравнивая данные слева и справа на рис. 8, можно отметить совпадение местоположения границы раздела на глубине приблизительно 0,5 метра. Эта граница является реально существующей, что показало вскрытие грунта на соответствующую глубину. Увеличение скорости при заполнении пространства пор жидкостью связано с увеличением модуля объемной жесткости в полном соответствии с моделью Гассмана–Бю эффективной среды [22]. При полном насыщении грунта жидкостью (водой) модуль сдвига уменьшается. В отличие от консолидированной горной породы, исследованной в Главе 1 диссертации, частички грунта несцементированы, и механизм уменьшения модуля сдвига аналогичен влиянию малого количества жидкости для карбонатной породы из Главы 1. Грунт содержит частицы гли-

ны, сцепляющие зерна песка (кварца). Наличие жидкости приводит к процессам интеркаляции, когда молекулы воды встраиваются между пластинками глины, уменьшая тем самым их прочность.

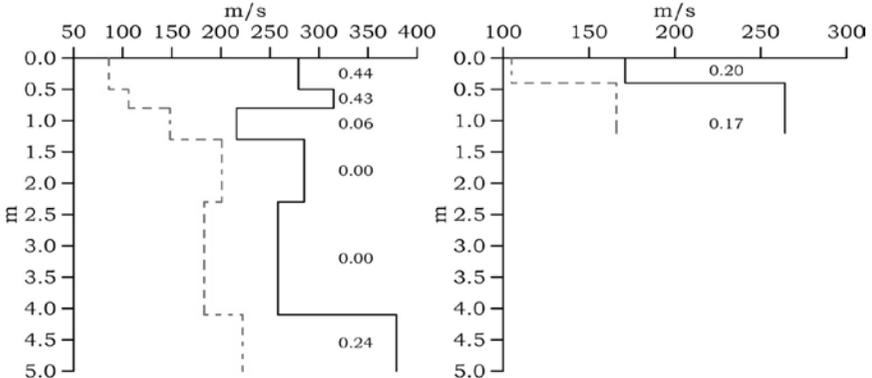


Рис. 8. Профиль скорости волны сдвига изображен штриховой линией, а профиль скорости продольной волны – сплошной линией. Числа отвечают коэффициенту Пуассона в слое. Левый рисунок отвечает влажному грунту, правый – сухому

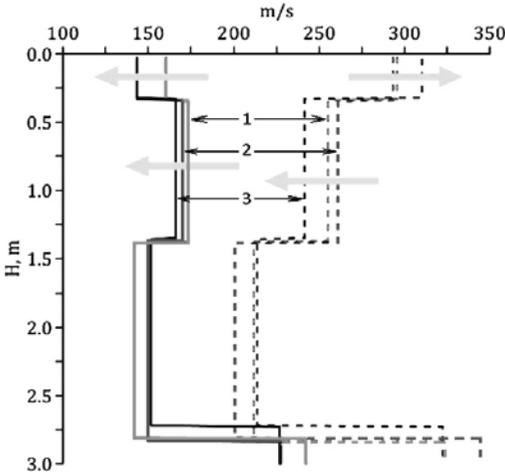


Рис. 9. Характер изменения во времени скорости волны сдвига (сплошные линии) и скорости продольной волны (пунктир) контролируемое насыщение грунта.

ся жидкостью. При этом скорость волны сдвига уменьшается из-за ослабления связей между зернами, а скорость продольной волны растет из-за увеличения объемной жесткости при заполнении пространства пор жидкостью. Таким образом, имеется согласие с результатами исследований, представленных в Главе 1 диссертации. Нижележащий слой до

На рис. 9. показаны результаты реконструкции параметров слоев во второй серии экспериментов (контролируемое насыщение грунта). Светло-серыми, отмеченными цифрой 1, показаны исходные профили. Темно-серыми линиями, отмеченными цифрой 2, показаны профили после увлажнения грунта $\approx 42 \text{ л/м}^2$. Наконец, черные линии, отмеченные цифрой 3, отвечают практически полному насыщению верхних слоев (100 л/м^2 воды). Нетрудно видеть, что верхний слой мощности 30 см равномерно насыщается

глубины 1.5 метра обнаруживает монотонное уменьшение обеих скоростей, что предположительно связано с ослаблением связей в гранулированной среде из-за процессов интеркаляции глинистых частиц.

В §3.3 приводится заключение к третьей главе.

Основные результаты третьей главы изложены в статьях [5*,6*,7*,8*].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Методом резонансной акустической спектроскопии проведено исследование линейных и нелинейных характеристик консолидированной горной породы в зависимости от насыщенности пор жидкостью. Высокая точность измерений позволила выделить стадии насыщения: конденсацию, образование менисков и монотонное заполнение пор жидкостью, которым отвечают качественные изменения акустических характеристик. Обнаруженная частотная дисперсия фактора потерь при насыщенности, близкой к полной, дает объяснение имеющихся в литературе расхождений в моделях затухания звука в донных осадочных породах.

2. При исследовании амплитудных зависимостей обнаружен неизвестный ранее эффект скачкообразного перехода от классической нелинейности к нелинейности гистерезисного типа при увеличении амплитуды колебаний для деформаций с изменением объема. Скачкообразное изменение модуля объемной жесткости сопровождается максимумом поглощения, что связывается с диссипативными процессами при отрыве контакта с адгезией. Уровень деформации, отвечающий качественному изменению режима колебаний, зависит от степени насыщения пор жидкостью и уменьшается по мере увеличения насыщенности.

3. Выполнены исследования по медленной динамике объемных и сдвиговых деформаций при возбуждении (накачке) на продольной и крутильной модах. Экспериментально доказано, что эффекты медленной релаксации связаны с процессами в области контакта структурных элементов гетерогенной среды, а соответствующие пространственные масштабы имеют порядок радиуса действия сил Ван-дер-Ваальса для консолидированных сред и порядок пространственного размера вакансий между зернами в случае сыпучих сред.

4. Предложен и апробирован новый метод измерений механоакустических свойств неконсолидированных сред, имеющий преимущества по сравнению с известными. Метод основан на регистрации относительного изменения резонансных частот колебаний контейнера заполненного сыпучим материалом. Проведенные на его основе исследования модельных гранулированных сред позволили обнаружить неизвестные ранее зависимости модулей объемной и сдвиговой жесткости от амплитуды деформаций.

5. Предложены и апробированы в натуральных условиях методы межскважинного фазового профилирования на когерентных SH-волнах и профилирования приповерхностных слоев на основе совместного анализа частотных

зависимостей фазовой скорости и отношения проекций смещения волны Рэлея. Экспериментально показано, что оба метода позволяют разрешить слоистую структуру при слабом контрасте геоакустических параметров (до единиц процентов).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176. – № 7. – С. 77-95.

2. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: the complex behaviour of granular media including rocks and soil. – Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

3. Зайцев В. Ю., Гурбатов С. Н., Прончатов-Рубцов Н.В. Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах: эксперименты и модели. – Н.Новгород: ИПФ РАН, 2009.

4. Назаров В.Е., Радостин А.В. Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2007.

5. Crocker M.J. Handbook of acoustics. – John Wiley & Sons, 1998.

6. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // J. Acoust. Soc. Am. – 1956. – V. 28. – N. 2. – P. 168-178.

7. Murphy W.F. Effects of partial water saturation on attenuation in Massilon sandstone and Vycor porous glass // J. Acoust. Soc. Am. – 1982. – V. 71. – N. 6. – P. 1458-1468.

8. Hamilton E.L. Sound attenuation as a function of depth in the sea floor // J. Acoust. Soc. Am. – 1976. – V. 59. – N. 3. – P. 528-535.

9. Stoll R.D. Marine sediment acoustics // J. Acoust. Soc. Am. – 1985. – V. 77. – N. 5. – P. 1789-1799.

10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987.

11. Pasqualini D., Heitmann K., TenCate J.A., Habib S., Higdon D., Johnson P.A. Nonequilibrium and nonlinear dynamics in Berea and Fontainebleau sandstones: Low-strain regime // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112. – P. B01204.

12. TenCate J.A., Shankland T.J. Slow dynamics in the nonlinear elastic response of Berea sandstone // Geophysical Research Letters. – 1996. – V. 23. – N. 21. – P. 3019-3022.

13. Lebedev A.V., Ostrovsky L.A. A unified model of hysteresis and long-time relaxation in heterogeneous materials // Acoustical Physics. – 2014. – V. 60. – N. 5. – P. 555-561.

14. Mueth D.M., Jaeger H.M., Nagel S.R. Force distribution in a granular medium // Physical Review E. – 1998. – V. 57. – N. 3. – P. 3164.

15. Guyon E., Bideau D. Mixing and Segregation in Granular Matter // Instabilities and Nonequilibrium Structures VI. – Springer, 2000. – P. 315-333.

16. Ширгина Н.В., Коробов А.И., Кокушайский А.И. Влияние статических и динамических внешних воздействий на упругие нелинейные свойства модели гранулированной неконсолидированной среды // Акустический журнал. – 2013. – V. 59. – N. 5. – P. 552-560.

17. Brunet T., Jia X., Johnson P.A. Transitional nonlinear elastic behaviour in dense granular media // Geophysical Research Letters. – 2008. – V. 35. – N. 19.

18. Lebedev A.V., Bredikhin V.V., Soustova I.A., Sutin A.M., Kusunose K. Resonant acoustic spectroscopy of microfracture in a Westerly granite sample // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). – 2003. – V. 108. – N. B10. – P. EPM11(1–12).

19. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. – М., 1981. – 176 с.

20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М: Наука, 1988.

21. Murphy W.F. Effects of microstructure and pore fluids on the acoustic properties of granular sedimentary materials: PhD Thesis – Stanford University, Department of Geophysics, 1982.

22. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media. – Cambridge university press, 2009.

23. Zaitsev V.Y., Gusev V.E., Tournat V., Richard P. Slow relaxation and aging phenomena at the nanoscale in granular materials // Physical Review Letters. – 2014. – V. 112. – N. 10. – P. 108302.

24. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н., Вировлянский А.Л., Малеханов А.И., Марышев А.П., Таланов В.И. Мощный внутрискважинный источник сдвиговых волн для когерентной сейсмоакустики // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51 (Приложение). – С. 31-45.

25. Коньков А.И. Разработка и экспериментальная апробация метода когерентной малоглубинной сейсмоакустической диагностики на основе поверхностных волн: диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н; ИПФ РАН. – Н.Новгород, 2016.

26. Xia J., Miller R.D., Park C.B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves // Geophysics. – 1999. – V. 64. – N. 3. – P. 691-700.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1*. Averbakh V.S., Bredikhin V.V., Lebedev A.V., Manakov S.A. Acoustic spectroscopy of fluid saturation effects in carbonate rock // Acoustical Physics. – 2010. – V. 56. – N. 6. – P. 794-806.

2*. Авербах В.С., Бредихин В.В., Коньков А.И., Лебедев А.В., Манаков С.А., Таланов В.И. Акустическая нелинейность гранита - сравнение данных натурального и лабораторного экспериментов // Акустический Журнал. – 2016. – Т. 62. – № 3. – С. 363-368.

3*. *Авербах В.С., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Нелинейная акустическая спектроскопия карбонатной горной породы // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 3. (в печати).

4*. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Манаков С.А., Бредихин В.В.* Новый метод акустических исследований сыпучих материалов. Предварительные результаты // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56. – № 3. – С. 149-172.

5*. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Манаков С.А., Таланов В.И.* Фазовый метод межскважинного профилирования на когерентных SH-волнах // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 5. – С. 596-602.

6*. *Авербах В.С., Коньков А.И., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И.* Методы когерентной инженерной сейсморазведки в Институте прикладной физики РАН // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 2. – С. 119-123.

7*. *Авербах В.С., Грибов Н.Н., Коньков А.И., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И.* Новый метод реконструкции неоднородностей среды с использованием волны Рэлея: примеры практического применения // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 10. – С. 1314-1320.

8*. *Konkov A.I., Lebedev A.V., Manakov S.A.* Rayleigh Wave Dispersive Properties of a Vector Displacement as a Tool for P- and S-wave Velocities Near Surface Profiling // Handbook of Geomathematics / W. Freedon, M. Z. Nashed, T. Sonar – 2 ed. – 2015. – P. 2189-2206.

9*. *Авербах В.С., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Нелинейная акустическая спектроскопия консолидированной горной породы и модельной гранулированной среды // Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества. Сб. трудов семинара научной школы проф. С.А.Рыбака. – М.: ГЕОС, 2012. – Вып. 13. – С. 94-110.

10*. *Averbach V., Bredikhin V., Lebedev A., Manakov S.* Resonant acoustic spectroscopy of the fluid saturation effects in a carbonate rock // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2010. – V. 128. – N. 4. – P. 2423-2423.

11*. *Лебедев А.В., Манаков С.А.* Сейсмоакустические методы исследования свойств природных сред в натуральных условиях // Труды XII научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения М.М.Кобрин / Под ред. С. М. Грача, А. В. Якимова. – Н.Новгород: ТАЛАН, 2008. – С. 212-214.

12*. *Авербах В.С., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Исследование акустических свойств песчаника при частичном заполнении пор флюидом // Труды XIII научной конференции по радиофизике, посвященной 85-летию со дня рождения М.А. Миллера / Под ред. С. М. Грача, А. В. Якимова. – Н.Новгород, 2009. – С. 170-171.

13*. *Авербах В.С., Боголюбов Б.Н., Лебедев А.В., Манаков С.А., Таланов В.И.* Межскважинное зондирование на SH-волнах - предварительные резуль-

таты // Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2008. – Т.1. – С. 324-327.

14*. *Казаков В.В., Лебедев А.В., Бредихин В.В., Манаков С.А.* Развитие экспериментальных методов исследования горных и осадочных пород // Сб. тезисов докладов XVI Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2010)». – Н.Новгород, 2010. – С. 380-381.

15*. *Авербах В.С., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Исследование акустических свойств карбонатной горной породы в зависимости от насыщения жидкостью // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2011. – Т.1. – С. 277-280.

16*. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Манаков С.А. Таланов В.И.* Межскважинное профилирование среды на SH-волнах в природных условиях // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2011. – Т.1. – С. 281-284.

17*. *Averbakh V.S., Bredikhin V.V., Lebedev A.V., Manakov S.A.* Nonlinear acoustic spectroscopy of rock sample and granular medium // Book Abstr. Forum Acusticum Krakow Pol. 7-12 Sept. – 2014.

18*. *Коньков А.И., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Акустическое профилирование с использованием портативного вибратора и цифровой сейсмостанции: волна Рэлея // Труды XV научной конференции по радиофизике, посвященной 110-й годовщине со дня рождения А. А. Андропова / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. – Н. Новгород: ННГУ, 2011. – С. 219-221.

19*. *Коньков А.И., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Диагностика природных сред на основе анализа частотных зависимостей фазовой скорости и амплитуд проекций смещения в волне Рэлея // Труды XVI научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А. Н. Бархатова / Под ред. С. М. Грача, А. В. Якимова. – Н. Новгород: ННГУ, 2012. – С. 225-226.

20*. *Konkov A.I., Lebedev A.V., Manakov S.A.* The Near Surface Profiling based on the Rayleigh Wave Dispersive Properties for Vector Displacement // Proceedings of the Near Surface Geoscience–2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Paris, 2012. – 5 p.

21*. *Коньков А.И., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Построение профиля скорости волны сдвига и коэффициента Пуассона на основе анализа характеристик волны Рэлея // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2012. – Т.1. – С. 332-336.

22*. *Konkov A.I., Lebedev A.V., Manakov S.A.* Subsoil characterization with use of acoustical methods // Official publication of congress «TECNIACÚSTICA 2013». – 2013. – P. 1124-1130.

23*. *Коньков А.И., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Дистанционная диагностика состояния грунтов с использованием информации о поверхностной волне Рэлея // Сборник трудов 1-ой Всероссийской акустической конференции. – 2014. – С. 52-58.

24*. *Авербах В.С., Коньков А.И., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И.* Развитие методов когерентной инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН // Сборник тезисов Научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2015». – 2015. – С.130-133.

25*. *Авербах В.С., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Манаков С.А.* Нелинейная акустическая спектроскопия карбонатной горной породы // Сборник трудов 1-й Всероссийской акустической конференции. – 2014. – С. 41-46.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Исследование акустических свойств пористой горной породы при разных степенях насыщения водой

- 1.1 Описание эксперимента
- 1.2 Описание образца
- 1.3 Зависимость модулей упругости и коэффициентов потерь от степени насыщения водой
- 1.4 Исследование нелинейного резонансного отклика образца карбонатной горной породы
- 1.5 Исследование медленной релаксации остаточных деформаций
- 1.6 Заключение

Глава 2. Исследования модельных гранулированных сред методом акустической спектроскопии

- 2.1 Описание экспериментальной установки
- 2.2 Модельные гранулированные среды
- 2.3 Зависимость модулей упругости от давления поджатия
- 2.4 Исследование нелинейных эффектов и релаксации в гранулированной среде
- 2.5 Заключение

Глава 3. Исследования дисперсных грунтов в натуральных условиях методами когерентной сейсмоакустики

- 3.1 Межскважинное профилирование на SH-волнах в натуральных условиях фазовым методом
- 3.2 Развитие фазовых методов измерения характеристик природных сред в натуральных условиях с использованием поверхностных волн
- 3.3 Заключение

Заключение

Список литературы

МАНАКОВ Сергей Александрович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД
МЕТОДАМИ КОГЕРЕНТНОЙ АКУСТИКИ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 15.12.2016 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 105 (2016).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. н. Новгород, ул. Ульянова 46