

Учреждение Российской Академии Наук
Институт Прикладной Физики РАН

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН
(г. Нижний Новгород)

На правах рукописи
УДК 534.222

Матвеев Лев Александрович

**«НЕКЛАССИЧЕСКИЕ» ПРОЯВЛЕНИЯ
НЕЛИНЕЙНОСТИ УПРУГИХ СРЕД
С МИКРОСТРУКТУРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

01.04.06 – акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Владимир Юрьевич Зайцев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Олег Анатольевич Сапожников

кандидат физико-математических наук
Николай Васильевич Прончатов-Рубцов

Ведущая организация: Научный Центр Волновых Исследований
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита диссертации состоится 31 мая 2010 года в 15.00 часов на заседа-
нии Специализированного 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 Института прикладной
физики РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
Д 002.069.01
к. ф.-м. н.

А.И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время стало широко признанным представление о том, что наличие нарушений структуры твердых тел может очень существенно менять их нелинейные акустические свойства по сравнению с идеальными кристаллами и однородными аморфными материалами. Для последних, как известно, уравнение состояния (т.е. связи «упругое напряжение-деформация») может быть разложено в степенной ряд вида $\sigma = E[\varepsilon + \beta\varepsilon^2 + \gamma\varepsilon^3 \dots]$, где σ - упругое напряжение, ε - деформация, E - упругий модуль, а безразмерные квадратичный и кубичный параметры нелинейности β и γ имеют значения порядка нескольких единиц, что хорошо согласуется с классическими представлениями о форме межатомного потенциала материала [Ч. Куттель, *Введение в физику твердого тела*, М.: Наука, 1978]. В связи с этим слабую нелинейность однородных конденсированных сред обычно называют решеточной (или атомарной, следуя терминологии, широко используемой в последние годы в англоязычной литературе). В то же время для многих сред, аналогичных по химическому составу, но имеющих такие над-атомарные микроструктурные особенности, как микротрещины или микроконтакты, расслоения, выраженную поликристаллическую структуру и т.д., аналогичные параметры нелинейности могут иметь на порядки более высокие значения. При этом очень часто сопутствующие изменения величин линейных упругих параметров микронеоднородного материала оказываются очень незначительными.

Для большинства реальных сред наличие разного рода структурных неоднородностей является скорее правилом и характерно, например, практически для всех горных пород, неконсолидированных гранулированных сред, многих конструкционных материалов, особенно с поврежденной структурой и т. п. Уже сам список сред, в которых проявляется аномальная микроструктурно-обусловленная нелинейность, в значительной мере объясняет высокий интерес, проявляемый в последние годы к изучению этого явления, для которого в литературе разными авторами используются различные названия. В частности, уже отмеченный высокий уровень микроструктурно-обусловленной нелинейности с полным правом дает основание называть ее «гигантской» [О.В. Руденко, *Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики*, УФН, 2006. 176. 77-95]. Очень важно также подчеркнуть, что аномальность структурно-обусловленных нелинейных свойств проявляется для упомянутого широкого класса материалов не только в повышенном уровне нелинейных эффектов, но часто и в очень существенном изменении их качественных (функциональных) особенностей. Например, степени в амплитудных зависимостях высших гармоник от амплитуды синусоидального возбуждения часто не соответствуют номерам этих гармоник, при этом могут наблю-

даться немонотонные или дробно-степенные амплитудные зависимости для высших гармоник, в ряде ситуаций проявляются выраженные нелинейно-диссипативные свойства, частотная зависимость нелинейности, эффекты медленной динамики и т.п. Такие эффекты не могут быть описаны классическими теориями нелинейной упругости (даже с подкорректированными по величине параметрами нелинейности), а потому этот круг нелинейно-акустических явлений в последние годы довольно часто в литературе называют «неклассическими», а саму нелинейность – неклассической [Л.А. Островский, *Неклассическая нелинейная акустика*, в сб.: *Нелинейные Волны*, 2004. 109-124; В.Ю. Зайцев, В.Е. Назаров, В.И. Таланов, "Неклассические" проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики, УФН, 2006. т. 176, 97-102; P.P. Delsanto, ed, *Universality of nonclassical nonlinearity: applications to non-destructive evaluations and ultrasonics*, Springer Verlag, 2006]. Можно отметить, что в виду важности и фундаментальных, и прикладных (прежде всего, диагностических) аспектов проблемы, в 2005 году была проведена специальная научная сессия Отделения Физических наук РАН «Нелинейная акустическая диагностика». Об актуальности этих исследований свидетельствует все возрастающее число докладов по теме структурно-обусловленной нелинейности на сессиях РАО и практически на всех основных международных акустических форумах. В последние годы вышел ряд монографий, полностью либо в значительной степени посвященных структурно-обусловленной акустической нелинейности [В. Назаров, А. Радостин, *Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах*. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2007; Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. *Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии*. М.: Физматлит, 2008; В. Зайцев, С. Гурбатов, Н. Прончатов-Рубцов, *Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах. Эксперименты и модели*. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2009; R.A. Guyer, P.A. Johnson, *Nonlinear Mesoscopic Elasticity: The Complex Behaviour of Rocks, Soil, Concrete*. Wiley-VCH, 2009].

Несмотря на достигнутый за последние 10-15 лет прогресс, к моменту начала работы над диссертацией в исследованиях, относимых по современной терминологии к неклассической структурно-обусловленной нелинейности, имелось значительное число недостаточно изученных аспектов. В частности, оставалась проблема дальнейшего развития моделей, адекватно описывающих характерные для многих таких сред нелинейно-диссипативные свойства, которые невозможно было объяснить разработанными в значительной большей степени моделями их нелинейно-упругих, а также нелинейно-гистерезисных свойств. Среди малоамплитудных нелинейных эффектов, обнаруженных в сейсмике и не находивших удовлетворительного объяснения в рамках известных представлений, оставалась, например, проблема выявления достаточно эффективных нелинейных механизмов, способных дать объяснение наблюдаемой сравнительно глубокой (на уровне от нескольких процентов) модуляции эндогенных сейсмических шумов приливными деформациями с характерной амплитудой 10^{-8} и менее.

Тесно связанными с этой проблемой являются вопросы о физически достижимых предельных величинах структурно-обусловленных нелинейных параметров и, если говорить о диагностических применениях нелинейно-акустических эффектов, вопрос о предельных возможностях нелинейно-модуляционного подхода к обнаружению трещиноподобных дефектов и о путях дальнейшего повышения чувствительности нелинейно-акустических методов. К решению именно этой группы вопросов относится данная диссертация.

Целями диссертационной работы являются следующие задачи, относящиеся к области неклассической нелинейной акустики структурно-неоднородных сред:

- Исследование особенностей такого «неклассического» нелинейного проявления микроструктуры как мало изученный механизм негистерезисного амплитудно-зависимого поглощения, основанный на комбинированном влиянии чисто упругой нелинейности дефектов и линейных по своей природе потерь (релаксационных, вязкостного или термоупругого типа), локализованных на этих же дефектах

- Изучение возможностей использования рассмотренного механизма порогового и негистерезисного амплитудно-зависимого поглощения для построения модели известного в нелинейной сейсмике эффекта модуляции эндогенных сейсмических шумов приливными деформациями земной коры, не имевшего удовлетворительной физической интерпретации уже более 25 лет.

- В плане исследования перспектив диагностических применений структурно-обусловленных акустических нелинейных эффектов ставилась задача изучения предельных возможностей нелинейно-акустического подхода и путей дальнейшего повышения чувствительности обнаружения дефектов за счет использования «неклассических» модуляционных эффектов (формально – модуляционных взаимодействий высших порядков).

- В связи с интересом к созданию материалов с управляемыми нелинейными свойствами - изучение возможностей реализации механизма управления гигантской нелинейностью микронеоднородного материала за счет использования микровключений с пороговым (по отношению к прилагаемому давлению) поведением.

Решению каждой из поставленных задач посвящена отдельная глава диссертации.

Научная новизна

1. В развитие известных реологических и физических моделей нелинейных и диссипативных свойств структурно-неоднородных сред проведен детальный анализ частотного поведения амплитудно-зависимого поглощения и сопутствующих вариаций упругого модуля. Выявлено, что фактически одни и те же параметры дефектов в одинаковой комбинации определяют характерные величины *относительных* вариаций упругого модуля и *абсолютные* вариации декремента, несмотря на различное частотное поведение.
2. Предложены физические модели диссипации в трещиносодержащих средах, принципиальным отличием которых является учет волнистого характера неровностей поверхностей реальных трещин. В результате предсказываемые параметры тензочувствительности декремента оказываются на 2-3 порядка выше величин, следующих из ранее обсуждавшихся моделей.
3. Для эффекта модуляции эндогенных сейсмических шумов приливными деформациями земной коры, более 25 лет не находившего удовлетворительной физической интерпретации, предложен механизм, основанный на развитых моделях амплитудно-зависимого поглощения.
4. Впервые в аналитическом виде сформулированы критерии, определяющие предельную чувствительность обнаружения трещин нелинейно-модуляционным методом. Проанализирована его связь с известным линейным методом, основанным на измерении сдвигов собственных частот образца при появлении трещины.
5. Проанализирован теоретически и реализован на примере искусственно созданного материала новый структурный механизм возрастания нелинейности за счет наличия в относительно слабосжимаемой среде матрице включений с пороговым поведением.

Научная и практическая значимость

- Построенные модели амплитудно-зависимого поглощения, помимо фундаментального интереса, имеют важное значение для понимания особенностей распространения и взаимодействия сейсмо-акустических волн в натуральных условиях, поскольку именно горные породы являются ярким примером структурно-неоднородных сред, в которых реализуются рассмотренные механизмы амплитудно-зависимой диссипации.

- Предложенные механизмы нелинейного поглощения позволили построить модель эффекта модуляции эндогенных сейсмических шумов деформациями земной коры, создаваемыми лунно-солнечными приливами, и дать объяснение спектральным и фазовым особенностям этой модуляции. Поскольку в последние годы стабилизацию фазы модуляции, наблюдающуюся пе-

ред землетрясениями, предлагается использовать в качестве признака приближения сейсмоопасных событий, развитые модели важны с точки зрения обоснования этих экспериментально установленных диагностических признаков.

- Полученные результаты по предельной чувствительности обнаружения трещин и предложенные пути ее повышения важны для дальнейшего развития нелинейно-акустических методов неразрушающего контроля. Сформулированные критерии служат обоснованием экспериментально выбираемых порогов обнаружения, а выявленные функциональные особенности нелинейных взаимодействий на дефектах с неаналитической нелинейностью могут быть использованы в качестве дополнительных признаков, повышающих надежность и чувствительность обнаружения трещин.

- Предложенная и экспериментально реализованная на искусственном материале модель гигантской нелинейности для сред, содержащих включения с пороговым по давлению поведением, расширяет известные представления о структурных механизмах возрастания акустической нелинейности. В частности, тонкостенные микросферы, служащие основой ультразвуковых контрастных агентов, являются типичным примером объекта с пороговым поведением, поэтому выявленные особенности нелинейности жидкости с «пузырьками», стабилизированными упругой оболочкой, могут быть интересны для развития новых нелинейно-акустических биомедицинских методов диагностики, подобных подходам, применяемым в неразрушающем контроле.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Комбинированное действие упругой нелинейности и линейной релаксации, локализованных на мягких дефектах в микронеоднородных упругих средах, может проявляться в виде ярко выраженной амплитудно-зависимой диссипации и действовать параллельно с известными гистерезисными нелинейными механизмами, что необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных.
2. Рассмотренные модели негистерезисного амплитудно-зависимого поглощения служат основой диссипативного механизма модуляции эндогенных сейсмических шумов приливными деформациями, который позволяет дать объяснение основным наблюдаемым особенностям этого эффекта.
3. Фоновая решетчатая нелинейность однородных упругих сред становится основным фактором, ограничивающим чувствительность обнаружения трещин нелинейными акустическими методами, основанными на использовании квадратичных по амплитуде эффектов. Дальнейшее по-

вышение предельной чувствительности нелинейно-модуляционных методов может быть достигнуто за счет использования модуляционных взаимодействий высших порядков.

4. Наличие в относительно слабосжимаемой матрице мягких включений с пороговым по величине внешнего давления поведением может приводить к появлению гигантской нелинейности материала, значительно превышающей нелинейность, возникающую за счет обычного «контрастно-мягкостного» механизма в случае аналогичных по относительной мягкости включений, не обладающих пороговыми свойствами. И величиной, и знаком такой нелинейности пороговой природы можно эффективно управлять с помощью оказываемого на среду внешнего давления.

Апробация работы. Публикации

Основные результаты, вошедшие в диссертацию опубликованы в 22 работах (включая 5 статей в реферируемых журналах) и докладывались на Научной конференции по радиофизике ННГУ (2005); 18-й, 19-й, 20-й Сессиях Российского Акустического Общества (2006-2008); 11-й, 12-й, 13-й, 14-й Нижегородских сессиях молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины 2006-2009); XIV-й, и XV-й научных школах «Нелинейные волны» - Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики (2008 и 2010); 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA-2008); конференции «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России» (2007); конференции «Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой» (НАНОМЕХ-2009).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 177 страниц, в том числе 41 рисунок, библиография - 181 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** на основе распределенной реологической модели микронеоднородной среды, содержащей мягкие дефекты, характеризуемые чисто упругой нелинейностью и линейными релаксационными свойствами, подробно обсуждается механизм возникновения в такой среде выраженного амплитудно-зависимого поглощения. В разделах 1.1, 1.2 обсуждается, при каких условиях комбинированное влияние отмеченные выше факторов (т.е. чисто упругой нелинейности и линейного поглощения) может проявляться как сильная диссипативная нелинейность. Результирующее амплитудно-

зависимое поглощение не связано с «истинно нелинейными» фрикционными или адгезионными потерями, которые обычно описываются в рамках гистерезисных нелинейных моделей. С другой стороны, проявления обсуждаемого негистерезисного механизма могут выглядеть очень похожими на проявления гистерезисной нелинейности, которая также может иметь место в том же самом микронеоднородном материале. В частности, амплитудные зависимости для вариаций упругого модуля и декремента за счет рассматриваемого механизма оказываются одинаковыми, как и в случае гистерезисной нелинейности.

В разделе 1.3 проводится подробное обсуждение сопутствующих изменений эффективного упругого модуля и декремента для пробной волны в присутствии дополнительного либо квазистатического, либо осциллирующего воздействия на материал. В частности, анализ результата квазистатического воздействия проведен для случая обычной квадратичной упругой нелинейности дефектов, на которых также локализовано линейное поглощения «вязкостного» типа (реально это могут быть, например, термоупругие потери в сухих или вязкие потери в флюидонасыщенных трещинах). В реологической модели локально связь напряжение-деформация для отдельного дефекта имеет вид $\sigma = \zeta E[\varepsilon_1 + F(\varepsilon_1)] + g d\varepsilon_1/dt$. Здесь мягкие дефекты характеризуются модулем $E_1 = \zeta E$ (где E - упругий модуль среды матрицы), параметром относительной мягкости $\zeta \ll 1$, коэффициентом эффективной вязкости g (учитываемой только на мягких дефектах), а также нелинейной функцией $F(\varepsilon_1)$, описывающей упругую нелинейность дефектов в терминах их локальной деформации ε_1 , многократно превышающей среднюю деформацию материала. В случае квадратичной нелинейности дефектов $F(\varepsilon_1) = \gamma \varepsilon_1^2$ и их относительной концентрации $\nu \ll 1$ для среды, подвергаемой средней деформации $\varepsilon_0 \gg \varepsilon_a$ (где ε_a - деформация в поле пробной волны) получаются следующие выражения для зависящих от ε_0 упругого модуля и декремента микронеоднородного материала:

$$E_{eff}/E - 1 = \Delta E/E \approx -\frac{\nu}{\zeta} \frac{1}{1+\bar{\omega}^2} - 2\varepsilon_0 \frac{\gamma \nu}{\zeta^2} \frac{1-\bar{\omega}^2}{(1+\bar{\omega}^2)^2}, \quad (1)$$

$$\theta = \theta_{lin} + \theta_{nl} \approx \pi \frac{\nu}{\zeta} \frac{\bar{\omega}}{1+\bar{\omega}^2} + 2\pi \varepsilon_0 \frac{\nu \gamma}{\zeta^2} \frac{2\bar{\omega}}{(1+\bar{\omega}^2)^2}. \quad (2)$$

Здесь E - модуль однородной среды матрицы, E_{eff} - модуль микронеоднородного материала, $\bar{\omega} = \omega/(\zeta g/E)$ - частота пробной волны, нормированная на релаксационную частоту дефекта, причем фоновым поглощением

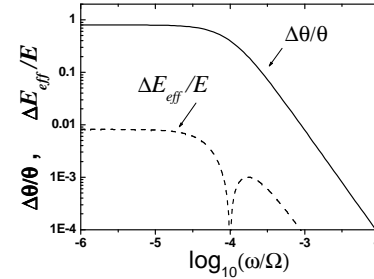


Рис.1. Частотное поведение зависящих от ε_0 сопутствующих относительных вариаций декремента $\Delta\theta/\theta$ и модуля упругости $|\Delta E/E|$ при статической деформации $\varepsilon_0 = 10^{-5}$ среды, содержащей одинаковые квадратично-нелинейные дефекты с показателем мягкости $\zeta = 10^{-4}$.

даже при малой концентрации $\nu \ll 1$ дефектов макроскопический параметр γ_{macro} обычно на порядки выше параметра собственной нелинейности дефекта $\gamma \sim 10^0$, поскольку относительная мягкость дефектов ζ часто может достигать $10^{-4} - 10^{-5}$ и даже менее (как в случае тонких трещин). На рис.1 приведены примеры рассчитанных одновременных вариаций упругого модуля и декремента в микронеоднородной среде с параметрами дефектов, типичными для трещин. Как видно, относительные вариации декремента практически на 2 порядка превышают относительное изменение упругого модуля, который при некоторой частоте $\bar{\omega} = 1$ (см. выражение (1)) меняет знак, проходя через нулевое значение. Качественно подобное поведение сохраняется и в случае широкого распределения дефектов по параметрам, в том числе и для дефектов с нечетной нелинейностью, обеспечивающей ненулевой средний эффект в случае осциллирующего воздействия на микронеоднородную среду. Отмеченный эффект смены знака вариаций упругого модуля для достаточно высоких частот может объяснять некоторые наблюдения увеличения скорости распространения ультразвуковой волны в образцах горных пород, хотя обычно для них наблюдается уменьшение упругого модуля с ростом амплитуды колебательного воздействия.

Далее в разделе 1.4 подробно обсуждается, что рассмотренный негистерезисный механизм амплитудно-зависимых потерь может наблюдаться параллельно с гистерезисной нелинейностью (например, за счет адгезионных и микрофрикционных эффектов), наличие которой является общепризнан-

в однородном материале-матрице можно пренебречь. Первые слагаемые в правых частях выражений соответствуют линейному (не зависящему от ε_0) вкладу дефектов, а вторые – вкладу, зависящему от ε_0 . Как видно из (1) и (2), с точностью до несколько различающихся частотных множителей, абсолютная добавка к декременту оказывается одного порядка с относительной поправкой в модулю упругости, так что относительные изменения декремента $\Delta\theta/\theta \gg \Delta E/E$, поскольку обычно $\theta \ll 1$. Указанные поправки определяются одинаковым по структуре безразмерным параметром нелинейности $\gamma_{macro} = \gamma \nu / \zeta^2$, причем

ным фактом для трещино- и контакто-содержащих твердых тел (практически всех горных пород). Проведенные оценки показывают, что параллельное действие рассмотренного негистерезисного механизма и традиционно обсуждаемой гистерезисной нелинейности может существенно (в разы) исказить оценки параметров гистерезиса на основе данных акустических измерений. Показывается, что практически единственной возможностью разделения вкладов этих механизмов в акустических экспериментах могут быть измерения в частотной области много ниже характерных релаксационных частот дефектов (квазистатики), где гистерезис проявляется себя в наибольшей степени, а рассмотренный негистерезисный механизм, наоборот, теряет эффективность. Учет этого факта может объяснять, почему, казалось бы, похожие по типу гистерезисной нелинейности материалы могут демонстрировать сильно отличающиеся величины параметра Рида (отношения нелинейных потерь к сопутствующему изменению упругого модуля).

В Главе 2 (раздел 2.1) на основе рассмотренного в Главе 1 механизма

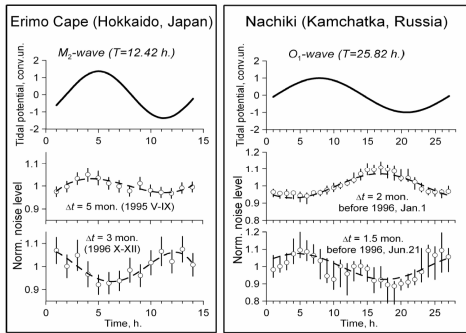


Рис. 2. Примеры временной изменчивости интенсивности сейсмических шумов, соответствующей периодичности приливных деформаций. В экспериментах регистрировались шумы с амплитудой деформаций порядка $10^{-12}..10^{-14}$ (т.е. много меньшей типичной амплитуды приливных деформаций 10^{-8}). Прием производился узкополосным сейсмореприемником с центральной частотой 30 Гц и добротностью $Q=100$.

амплитудно-зависимой диссипации, возникающей за счет комбинированного действия линейных по своей природе потерь на податливых дефектах и их упругой нелинейности, предлагается объяснение известного свыше 25 лет, но не находившего удовлетворительной физической интерпретации эффекта приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов. Показано, что даже если приливные деформации $\varepsilon_0 \sim 10^{-8}$ еще не вызывают микроразрушения пород и сейсмоакустическую эмиссию, они уже способны существенно менять уровень поглощения за счет рассмотренного механизма амплитудно-зависимой диссипации. При этом изменение эффективного

размера области сбора источников шума $A_i \propto A_0^i \exp[-\theta(\omega)r_i/\lambda]/r_i$ (где r_i - расстояние до i -го источника, а λ - длина акустической волны) должно

приводить к модуляции интенсивности $I(\omega)$ регистрируемого приемником шумового сигнала:

$$I(\omega) \propto \sum_i A_i^2 \propto \int_0^\infty \left(\frac{\exp[-\theta(\omega)\frac{r}{\lambda}]}{r} \right)^2 r^2 dr \propto \frac{\lambda}{\theta(\omega)}; \Rightarrow \frac{\Delta I}{I(\omega)} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} - \frac{\Delta \theta}{\theta} \approx -\frac{\Delta \theta}{\theta} \quad (3)$$

Причем для вариаций интенсивности доминирующую роль должны играть именно вариациями поглощения, а не упругих свойств среды (см. выражения (1), (2)). Оценки показывают, что при реалистичных предположениях о параметрах дефектов приливные деформации $\varepsilon_0 \sim 10^{-8}$ способны вызывать вариации $\Delta I(\omega)/I(\omega) \sim 0.01-0.1$, согласующиеся с наблюдаемым уровнем эффекта (см. рис.2).

В развитие реологического уровня рассмотрения, в разделе 2.2 проводится анализ двух важнейших для распространения малоамплитудных сейсмических волн видов потерь: на сухих трещинах (за счет термоупругости) и насыщенных вязкой жидкостью трещинах. Ключевым моментом в обоих случаях является учет роли полосковых (вытянутых) контактов, которые должны возникать в реальных трещинах с неровными (волнистыми) границами. В силу самой геометрии, величина поджатия (или, наоборот, локального раскрыва) такого контакта значительно меньше среднего раскрыва трещины. Поэтому внешнее воздействие, которое еще практически не меняет раскрыва всей трещины, уже способно существенно изменить состояние такого контакта и, соответственно, заметно изменить уровень потерь акустической энергии в области контакта. Следующее ключевое утверждение состоит в том, что в силу локальной концентрации напряжений и градиентов температуры (для сухих трещин) либо градиентов скоростей флюида (при наличии флюидонасыщения) величина соответствующего релаксационного максимума поглощения в окрестности полоскового контакта оказывается сравнима с величиной рассматриваемых традиционными моделями аналогичных потерь на трещине в целом (хотя положения максимумов таких локальных потерь и потерь на всей трещине сильно разнесены на оси частот).

Для проводимого рассмотрения существенно, что ширина контактов l является существенно независимой величиной параметров L, L_c , характеризующих размер всей трещины и длину полоскового контакта, так что соответствующая функция распределения должна факторизоваться, $n(L, L_c, a) = n(L, L_c)n(l)$. В результате в случае термоупругих потерь на сухих трещинах для декремента, включающего фоновую и зависящую от вариаций средней деформации $\Delta \varepsilon$ составляющие, получается выражение

$$\theta(\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon) = \frac{2\pi T_0 \mu_T^2 K}{\rho C} \int L_c L^2 \frac{\omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} n(L, L_c) n(\tau) dL dL_c d\tau + \frac{2\pi T_0 \mu_T^2 K}{\rho C} \int L_c L^2 \frac{\omega \tau (1 - \omega^2 \tau^2)}{(1 + \omega^2 \tau^2)^2} \left(\frac{RL}{l^2}\right) \Delta\varepsilon \cdot n(L, L_c) n(\tau) dL dL_c d\tau, \quad (4)$$

где ω — круговая частота, T_0 — температура, μ_T — коэффициент объемного теплового расширения, K — модуль объемного сжатия, ρ — плотность, C — удельная теплоёмкость, ε — средняя деформация в материале, κ — коэффициент теплопроводности, $\omega_l \approx \kappa / (\rho C l^2)$ — характерная частота терморелаксации на контакте, $R \sim L$ — характерный радиус контакта. Возникающая во втором слагаемом комбинация параметров $\Delta\varepsilon RL/l^2$ имеет смысл относительного изменения частоты релаксационного максимума $|\Delta\omega_l / \omega_l|$, причем фактор RL/l^2 может достигать значений $10^6 \dots 10^8$, так что даже приливные деформации на уровне 10^{-8} могут изменять частоту термоупругой релаксации для таких внутренних контактов на единицы и даже десятки процентов, вызывая изменения поглощения на величину того же порядка.

Аналогичного типа выражения получаются и в случае вязкоупругого поглощения, причем и в этом случае величина максимума потерь около почти перекрывающую трещину контакта оказывается примерно равна величине максимума потерь за счет обычно рассматриваемых вязких потоков в трещине. По уже отмеченным геометрическим причинам тензочувствительность локальных потерь вблизи контакта оказывается многократно выше, чем вязкие потери за счет средних потоков в трещине. Эффективность рассмотренных механизмов достаточно высока, чтобы обеспечить появление чрезвычайно высокой тензочувствительности результирующего декремента, даже если трещины с внутренними полосковыми контактами составляют малую долю от общего числа трещин.

Основные исходные предположения предложенного диссипативного механизма приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов базируются на хорошо известных и надежно установленных особенностях структуры горных пород и свойств трещин. Получаемые количественные оценки уровня приливной модуляции, хорошо согласуются с данными наблюдений. Более того, этот механизм предсказывает, что в условиях стабильно высоких тектонических напряжений перед землетрясениями фаза модуляции должна стабилизироваться и может меняться на противоположную при резких изменениях уровня напряжений в результате прохождения землетрясений, что также согласуется с наблюдениями.

В **Главе 3** обсуждается важная прикладная сторона исследований структурно-обусловленной акустической нелинейности — активно развиваемый в последние годы метод обнаружения трещин по наблюдению по-

вышенного уровня модуляционного взаимодействия пробной волны и более интенсивного воздействия-накачки в образце с дефектами. Несмотря на многочисленные известные демонстрации возможностей метода, до последнего времени не было ясного понимания физических ограничений на его чувствительность.

В разделе 3.1 рассматриваются этот вопрос и, соответственно, получают критерии, определяющие минимальные размеры трещин обнаруживаемых резонансным нелинейно-модуляционным методом. Для этого в разделе 3.1.1 сначала оценивается вклад фоновой атомарной нелинейности в величину квадратичных модуляционных компонент. Далее, в разделе 3.1.2 на основе теории возмущений вначале рассматривается влияние трещиноподобного дефекта на сдвиг резонансных частот образца (т.е. линейный эффект). Затем, предполагая, что раскрыв трещины квазистатически медленно модулируется дополнительным колебанием-накачкой и, соответственно, модулируется величина сдвига собственных частот за счет присутствия трещины), получена оценка глубины возникающей при этом модуляции пробной волны. Такой подход позволил провести наглядное сравнение нелинейно-модуляционного метода с известным линейным методом обнаружения трещин за счет наблюдения сдвига собственных частот образца. В разделе 3.1.3 проведена динамическая оценка уровня модуляции в случае квадратично-нелинейной трещины, согласующаяся с результатами раздела 3.1.2.

Из сравнения полученных выражений для уровня модуляции за счет фоновой решеточной (атомарной) нелинейности и нелинейности трещиноподобного дефекта получается критерий, определяющий минимальный размер обнаруживаемого дефекта. Показано, что ключевую роль играет аспект-отношения трещины α (т.е. отношение раскрыва трещины к ее диаметру). Если характеризовать трещину ее эффективным объемом \tilde{V} (объемом описанной вокруг нее сферы), то размер минимально обнаруживаемой резонансным нелинейно-модуляционным методом трещины определяется условием $\tilde{V} \geq \alpha V_0$ (где V_0 — объем образца). Для сравнения, аналогичный критерий для линейного метода, использующего сдвиг собственных частот, имеет вид $\tilde{V} \geq (\delta\omega_n / \omega_n) V_0$, где $\delta\omega_n / \omega_n$ — пороговая (значимая) величина сдвига собственных частот, которая обычно не может быть выбрана менее нескольких процентов (т.е. $\sim 10^{-2}$). С другой стороны, для тонких зарождающихся трещин типичное аспект-отношение $\alpha = 10^{-4} - 10^{-5}$, что объясняет существенное превосходство в чувствительности нелинейного подхода. Проведенное сравнение с данными выполненных нелинейно-модуляционных экспериментов показывает, что при современном уровне технических средств (уровня шумов измерений и линейности аппаратуры) возможности дальнейшего повышения чувствительности обнаружения на

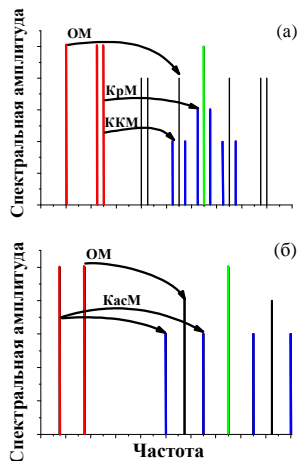


Рис. 3. Схематическое пояснение различий характера модуляционных эффектов. *ОМ* – обычные квадратичные модуляционные компоненты ($\omega \pm \Omega_{i,j}$); *КрМ* – кросс-модуляционная компонента, т.е. перенос модуляции с модулированной волны накачки на пробную; *ККМ* – каскадная кросс-модуляция, т.е. перенос модуляции с модулированной волны накачки на модуляционную компоненту, образующуюся при взаимодействии пробной волны с другой, немодулированной волной накачки; *КасМ* – каскадная модуляция, формально – модуляционные лепестки третьего порядка $\omega \pm \Omega_i \pm \Omega_j$.

В разделе 3.4 проводится детальное сопоставление выделяемых в экспериментальных записях модуляционных компонент различных порядков (обычного квадратичного и каскадного типов по терминологии рис. 3) с результатами моделирования их функциональных зависимостей от амплитуд накачки. Показывается, что в случае типичной для трещиноподобных дефектов «хлопающей» неаналитической нелинейности поведение модуляционных компонент функционально заметно отличается от поведения, ожидаемого для степенной нелинейности, что само по себе может уде слу-

основе описываемых в квадратичном приближении нелинейных взаимодействий уже практически исчерпаны.

Для дальнейшего повышения чувствительности нелинейно-модуляционного метода в разделах 3.2, 3.3 и 3.4 предложена его модификация, основанная на анализе нелинейных взаимодействий формально более высоких (чем квадратичный) порядков. А именно, в разделах 3.2 и 3.3 рассмотрены экспериментальные примеры выделения других типов нелинейных взаимодействий: кросс-модуляция, каскадная кросс-модуляция и каскадная модуляция (схематически показаны на рис. 3). Показано, что вклад атомарной нелинейности в величину таких модуляционных компонент на порядки ниже ее вклада в обычно наблюдаемые модуляционные компоненты квадратичного типа. В то же время, при взаимодействии волн на дефектах, за счет модуляции их параметров (т.е. за счет существенного отличия нелинейности трещин от квадратичной, вплоть до неаналитического характера), высшие модуляционные компоненты могут иметь уровень, сопоставимый с уровнем обычно наблюдаемых модуляционных компонент квадратичного типа $\omega \pm \Omega_{i,j}$.

4. приведен пример выделения таких более сложных компонент типа $\omega \pm \Omega_i \pm \Omega_j$ на основе данных экспериментов по нелинейно-модуляционному обнаружению трещиноподобных дефектов в осях и дисках железнодорожных колесных пар.

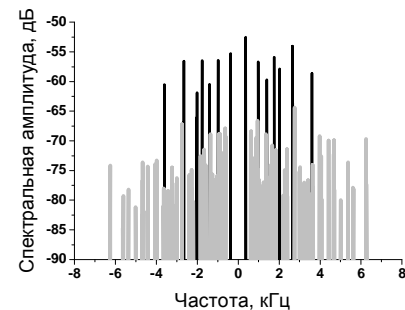


Рис. 4. Примеры нормированного на уровень пробной волны модуляционного спектра для образца с дефектом. Чёрные линии соответствуют квадратичным модуляционным компонентам $\omega \pm \Omega_{i,j}$, более светлые линии – каскадным компонентам $\omega \pm (\Omega_i \pm \Omega_j)$. Частота пробной волны сдвинута на ноль.

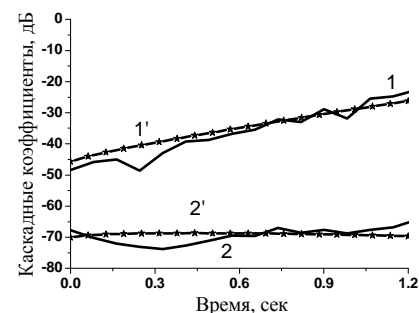


Рис. 5. Нормированная амплитуда каскадной компоненты типа $\omega \pm (\Omega_i \pm \Omega_j)$ в случае кубической нелинейности, образующихся при взаимодействии мод накачки на 903 Гц и 2916 Гц. Сплошные кривые – эксперимент; кривые со звездочками – результат расчета с использованием модели нелинейности хлопающего герцевского контакта.

жить диагностическим признаком наличия в образце дефекта. Полагая, что нелинейность реальной трещины с неровными поверхностями обусловлена, в основном, нелинейностью возникающих внутренних контактов, вполне можно моделирование ожидаемых амплитудных зависимостей модуляционных компонент различного порядка при переходе колебаний дефекта от режима без хлопания к существенно неаналитическому хлопающему режиму. При этом специальное внимание уделено случаю многочастотных взаимодействий, часто имеющему место в резонансных экспериментах, в которых волны накачки возбуждаются ударным воздействием.

Для данных той же серии экспериментов, что и в случае рис.4, в рамках такой модели оказывается возможным неплохо описать наблюдаемые амплитудные зависимости модуляционных компонент, порождаемых постепенно затухающими ударно-возбуждаемыми модами накачки. На рис.5 показан пример такого рода для компоненты вида $\omega \pm (\Omega_i \pm \Omega_j)$. При нормировке ее амплитуды на амплитуды всех трех взаимодействующих мод результат не должен зависеть от времени в случае обычной кубической нелинейности, но должен быть непостоянным в случае хлопающей герцевской нелинейности. Именно такое непостоянство демонстрируют экспериментальная и модельная кривые 1 и 1'. В то же время при нормировке «хлопающего» типа (с поправкой на корень из амплитуды наиболее интенсивной моды) получается гораздо более стабильное значение, как показывают

экспериментальная и модельная кривые 2 и 2'. Эти и подобные результаты однозначно указывают на существенно неаналитический (хлопающий) режим деформации трещин при типичных для таких экспериментов деформациях накачки $\sim 10^{-5}$. Эта неаналитичность не столь значительно меняет зависимости для модуляционных компонент квадратичного типа $\omega \pm \Omega_i$, но очень заметно меняет и уровень, и качественные зависимости для высших компонент. Выявленные эффекты предлагается использовать в основе новой техники обнаружения дефектов (трещин, расслоений и т.д.) в однородных образцах.

В **Главе 4** рассмотрен пример структурного механизма возрастания акустической нелинейности, для которого в дополнение к обсуждавшемуся в предыдущих главах условию высокого контраста упругих параметров среды-матрицы и мягких включений ключевую роль играет также специфический пороговый характер реакции мягких включений на прилагаемое упругое напряжение (давление). В разделе 4.1 рассматривается модель упругой нелинейности порогового происхождения на конкретном примере искусственного микронеоднородного материала. В качестве среды-матрицы при этом используется так называемая почти-несжимаемая среда (для которой модуль сдвига много меньше продольного модуля), а роль включений играют полости, окруженные упругой оболочкой. При всем сходстве с обычными порами или пузырьками наличие упругой оболочки радикально меняет упругие свойства этих включений. Действительно, при достижении некоторого порогового давления $p_{cr} = 2\tilde{E}t^2 / (R^2 \sqrt{3(1-\nu^2)})$ (где \tilde{E} - модуль Юнга материала оболочки, ν - ее коэффициент Пуассона, t и R - толщина и радиус оболочки, соответственно) происходит смятие оболочки, после чего сжимаемость такой полости многократно возрастает. Такое пороговое поведение радикально меняет зависимость результирующего модуля сжатия содержащей их среды от прилагаемого давления. Для сред с безоболочечными пузырьками и порами сжимаемость понижается с увеличением давления. В противоположность этому для материалов, содержащих микросферы с оболочкой, сжимаемость может возрастать, а скорость звука $c(p)$ (и, соответственно, модуль сжатия K_{eff}) - падать с ростом прилагаемого давления. Таким образом, знаки производных dc/dp и dK_{eff}/dp (иными словами, знаки параметра нелинейности) оказываются противоположными для микросфер в оболочке и безоболочечных пузырьков и пор. После сминания оболочки такие включения ведут себя почти как обычные поры или пузырьки, т.е. дают сильный положительный вклад в результирующую величину dc/dp в соответствии с обычным «контрастно-мягким» механизмом возрастания нелинейности. Отрицательный знак dc/dp может наблюдаться при условии, что вклад эффекта сминания обо-

лочек является доминирующим. В предположении одинаковости толщины оболочек для эффективного упругого модуля микронеоднородного материала получаем

$$1/K_{eff} = 1/K + \int_{r(p=p_{cr})}^{\infty} [g_1(R, p)]n(R)dR \quad (5)$$

где K - модуль сжатия матрицы, $n(r)$ функция распределения полостей по радиусам, а сжимаемость g_1 полости в оболочке зависит, вообще говоря, от текущего значения давления p , так что до сминания оболочки вкладом полости в сжимаемость можно пренебречь. Ключевое отличие уравнения (5) от аналогичных уравнений в случае обычных пузырьков и пор заключается в том, что нижний предел интеграла по функции распределения является зависящим от давления. Из (5) для безразмерного квадратичного параметра нелинейности среды $\beta = dK/dp$ (часто называемого в литературе параметр B/A), можно получить, что $\beta = \beta_c + \beta_{th}$, где вклады от порогового сминания β_{th} и обычный вклад β_c от мягких пузырьков и пор имеют вид:

$$\beta_{th} = K_{eff}^2 \frac{dR_{cr}(p)}{dp} g_1(R_{cr}, p)n(R_{cr}), \quad \beta_c = -K_{eff}^2 \int_{r(p=p_{cr})}^{\infty} [dg_1(R, p)/dp]n(R)dR, \quad (6)$$

здесь $R_{cr}(p)$ - наименьший радиус микросфер, которые сминаются при заданном давлении. Результирующий коэффициент нелинейности среды с такими включениями в случае доминирования порогового слагаемого может иметь знак противоположный знаку нелинейности подавляющего большинства других сред (материал при сжатии становится более мягким). При этом уровень нелинейности может достигать гигантской величины даже в сравнении с другими высоконелинейными микронеоднородными средами, причем как величиной, так и знаком этой нелинейности можно управлять, изменяя среднее прилагаемое давление. В разделе 4.2 оценивается предельная величина такого отрицательного параметра нелинейности в случае наличия в слабосжимаемой матрице оболочечных сферических включений с относительно узким распределением по радиусам с шириной ΔR и центральным значением R_0 . При этом получается следующая оценка максимального по модулю значения параметра нелинейности, определяемой, в основном, вкладом порогового механизма:

$$\beta \approx \beta_{th} \approx -\frac{K}{4\tilde{E}} \frac{R_0^2}{t^2} \frac{R_0}{\Delta R}. \quad (7)$$

Выбирая параметры типичные, например, для коммерчески производимых микросфер типа EXPANCEL-091WE40 d24 ($K/\tilde{E} \approx 1$, $R/t \approx 500$ и $R/\Delta R \approx 8$), отсюда получаем оценку $|\beta| \approx 0.5 \times 10^6$. В разделе 4.3 приводится

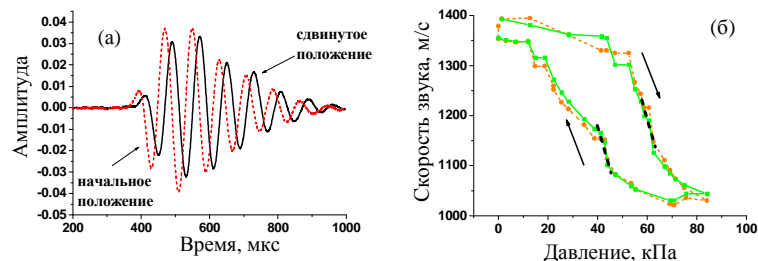


Рис. 6. Экспериментальная демонстрация запаздывания импульса пробной волны в микронеоднородном образце за счет уменьшения скорости распространения при создании в материале деформации сжатия 7×10^{-6} (а) и график зависимости скорости пробной волны от статического давления (б). Сплошная линия соответствует измерениям задержки по положению первого минимума импульса, штриховая – по изменению фазы спектральной компоненты, соответствующей максимуму спектра импульса. Стрелки показывают ход нагружения и последующей разгрузки образца.

экспериментальная демонстрация нелинейных свойств искусственного материала, созданного на основе желатиновой матрицы с добавлением микросфер EXPANCEL. На рис. 6 приведен пример экспериментальной зависимости скорости звука в таком материале, демонстрирующий, что при сравнительно небольших изменениях давления скорость звука в нем может падать примерно на 30%, причем на выделенных на рис.6(б) фрагментах кривой $c(p)$ значение квазистатического параметра нелинейности может достигать рекордных величин $|\beta| = |dK_{eff}/dp| \sim (0.5 + 1) \cdot 10^5$ (где $K_{eff} = \rho c^2$ величина упругого модуля, p – давление, ρ и c – плотность среды и скорость звука, соответственно).

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведено сопоставление традиционно рассматривающихся гистерезисных потерь и негистерезисной амплитудно-зависимой диссипации, основанной на комбинированном проявлении упругой нелинейности и линейной релаксации, локализованных на мягких дефектах в линейно-упругой матрице. Показано, что вклады этих механизмов в величину нелинейных потерь могут быть сравнимы, что следует учитывать при экспериментальном определении параметра Риды, который традиционно считается важной характеристикой гистерезисной нелинейности.
2. На основе рассмотренной реологической модели негистерезисной амплитудно-зависимой диссипации предложен механизм модуляции эндогенных сейсмических шумов приливными деформациями земной коры.

Параметры модели, определенные на основе данных по приливной модуляции излучений искусственных сейсмических источников, обеспечили хорошее согласование предсказываемого и наблюдаемого уровней модуляции эндогенных шумов.

3. В развитие диссипативной модели приливной модуляции сейсмических шумов, первоначально развитой на реологическом уровне, предложены физические механизмы диссипации термоупругого и вязкостного типов, характеризующиеся гигантской чувствительностью к средней деформации в среде за счет наличия сухих либо флюидонасыщенных трещин с неровными поверхностями, что типично для реальных трещин. На их основе предложена интерпретация не только уровня приливной модуляции шумов, но и существенных особенностей вариации ее фазы и спектрального состава, наблюдаемых в окрестности моментов землетрясений.
4. Для нелинейно-модуляционного метода обнаружения трещин, основанного на использовании квадратичных эффектов, получены физические критерии, определяющие предельную чувствительность обнаружения, которая ограничивается принципиально неустранимой фоновой решеточной нелинейностью среды.
5. Для дальнейшего повышения чувствительности метода предложено использовать высшие модуляционные взаимодействия, уровень которых для дефектов с неаналитической нелинейностью может быть сопоставим с уровнем модуляционных компонент низшего порядка, а функциональное поведение отличается от результата взаимодействия на степенной нелинейности третьего и четвертого порядков. Выполнены экспериментальные демонстрации реализуемости предложенного подхода.
6. Построена модель возрастания упругой нелинейности за счет наличия в относительно слабосжимаемой среде-матрице включений с пороговым поведением. Экспериментально продемонстрирован реализующий этот механизм материал на основе резиноподобной среды, содержащей микроразрывы, окруженные тонкими упругими оболочками. Уровнем и знаком нелинейности в таком материале можно управлять прилагаемым внешним давлением. В эксперименте получены рекордные значения квазистатического квадратичного параметра нелинейности более 10^5 .

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В. Зайцев, Л. Матвеев, "Амплитудно-зависимая диссипация в микронеоднородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью," *Геология и геофизика*, vol. 47, 2006, 695–710.

2. В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев, А.Л. Матвеев, W. Arnold, "Каскадная кросс-модуляция при нелинейном взаимодействии упругих волн в образцах с трещинами," *Акустический журнал*, vol. 54, 2008, pp. 459-468.
3. В.Ю. Зайцев, В.А. Салтыков, Л.А. Матвеев, "О связи приливной модуляции сейсмических шумов с амплитудно-зависимыми потерями в горных породах," *Акустический журнал*, vol. 54, 2008, 621-628.
4. V.Y. Zaitsev, A. Dyskin, E. Pasternak, L. Matveev, "Microstructure-induced giant elastic nonlinearity of threshold origin: Mechanism and experimental demonstration," *Europhysics Letters*, vol. 86, 2009, 44005 1-6.
5. V.Y. Zaitsev, L.A. Matveev, A.L. Matveyev, "On the ultimate sensitivity of nonlinear-modulation method of crack detection," *NDT&E International*, vol. 42, 2009, 622-629.
6. V. Zaitsev, L. Matveev, A. Matveyev, "Nonlinear-Acoustic Damage Detection in Solid Samples : Comparison Between Conventional Modulation Technique and Double-Modulation," *Nonlinear Acoustics - Fundamentals and Applications (ISNA 18), 18th International Symposium*, B. Enflo, C. Hedberg, and L. Kari, Stockholm, Sweden: 2008, 581-584.
7. V. Zaitsev, V. Saltykov, L. Matveev, "Nonhysteretic Nonlinear Losses at Intergrain Contacts in Rocks: Application to Tidal Modulation Phenomena in Seismics," *Nonlinear Acoustics - Fundamentals and Applications (ISNA 18), 18th International Symposium*, B. Enflo, C. Hedberg, and L. Kari, Stockholm, Sweden: 2008, 421-424.
8. В. Зайцев, Л. Матвеев, "О микроструктурно-обусловленном амплитудно-зависимом поглощении негистерезисного происхождения," *Сб. трудов 18-ой Сессии Российского Акустического Общества (Таганрог, 14-18 сентября, 2006). Т. 1*, 2006, 318-322.
9. В. Зайцев, Л. Матвеев, А. Матвеев, "Каскадные модуляционные эффекты в образцах упругих сред с микроструктурно-обусловленной нелинейностью," *Сборник Трудов XIX сессии Российского акустического общества, Т.1*, Москва: М.: ГЕОС, 2007, 189-193.
10. В. Зайцев, В. Салтыков, Л. Матвеев, "Негистерезисные амплитудно-зависимые потери в геоматериалах и модуляция сейсмических шумов приливыми деформациями," *Сборник Трудов XIX сессии Российского акустического общества, Т.1*, Москва: М.: ГЕОС, 2007, 324-227.
11. В. Зайцев, Л. Матвеев, "Предельная чувствительность нелинейно-акустических методов обнаружения дефектов в упругих средах: физические ограничения," *Сборник Трудов XX сессии Российского акустического общества, Т. 1*, 2008, 133-136.
12. В. Зайцев, Л. Матвеев, А. Матвеев, "Модуляционный метод обнаружения трещиноподобных дефектов: сравнение обычных и каскадных модуляционных взаимодействий," *Сборник Трудов XX сессии Российского акустического общества. Т.1*, 2008, 136-140.
13. В. Зайцев, Л. Матвеев, "Амплитудно-зависимые потери в микронеоднородной среде с линейным поглощением и упругой нелинейностью," *Труды девятой Научной конференции по радиофизике ННГУ*, Нижний Новгород: 2005, 263-264.
14. В. Зайцев, Л. Матвеев, "Амплитудно-зависимое поглощение в микронеоднородных средах: сравнение вкладов гистерезисного и негистерезисного механизмов," *Труды 11 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины)*, Нижегородская обл.: 2006, 33.
15. В. Зайцев, В. Салтыков, Л. Матвеев, "Модуляция сейсмических шумов приливыми деформациями: возможный механизм на основе амплитудно-зависимой диссипации негистерезисного типа," *Труды 14 Нижегородской сессии молодых учёных (Естественнонаучные дисциплины)*, Нижегородская обл.: 2009, 71-72.
16. Л. Матвеев, В. Зайцев, "Каскадная кросс-модуляция в средах с «неклассической» нелинейностью," *Труды 12 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины)*, Нижегородская обл.: 2007, 65-66.
17. Л. Матвеев, В. Зайцев, "Использование каскадной модуляции в задачах обнаружения трещиноподобных дефектов в твердотельных образцах," *Труды 13 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины)*, Нижегородская обл.: 2008, 116.
18. В. Зайцев, В. Салтыков, Л. Матвеев, "Модель модуляции сейсмических шумов приливыми деформациями," *Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. Т.2*, 2008, 19-23.
19. В. Зайцев, А. Dyskin, Л. Матвеев, Е. Pasternak, "Пороговый механизм структурно-обусловленной акустической нелинейности на примере упругой слабо сжимаемой среды, содержащей микровключения с пороговым поведением," *Сборник трудов конференции «Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: НАНОМЕХ-2009»*, Нижний Новгород: 2009, 62-68.
20. В. Зайцев, В. Салтыков, Л. Матвеев, "Модуляция сейсмических шумов приливыми деформациями. Возможная интерпретация наблюдаемых эффектов," *Труды Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов*, Томск: 2009, 272-274.
21. В. Зайцев, Л. Матвеев, А. Матвеев, "Модуляционные эффекты высших порядков при взаимодействии упругих волн в образцах с микроструктурно-обусловленной «неклассической» нелинейностью," *XIV научная школа «Нелинейные волны» - Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики, Тез. докл. Конф. молодых ученых*, Нижний Новгород: Изд. ИПФ РАН, 2008, 110-111.
22. В. Зайцев, В. Салтыков, Л. Матвеев, "К объяснению фазовых свойств и спектрального состава модуляции сейсмических шумов приливыми деформациями," *XV научная школа «Нелинейные волны» - Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики, Тез. докл. Конф. молодых ученых*, Нижний Новгород: 2010. 84-85

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. Амплитудно-зависимое поглощение в микронеоднородных средах, обусловленное чисто упругой нелинейностью дефектов и линейными потерями на них

- 1.1 Традиционное объяснение амплитудно-зависимой диссипации за счет гистерезисной нелинейности. Параметр Рида
- 1.2 Реологическая модель микронеоднородной нелинейной вязкоупругой среды, описывающая негистерезисные амплитудно-зависимые потери
- 1.3 Характер амплитудно-зависимых потерь для различных типов упругой нелинейности дефектов
- 1.4 Сопоставление гистерезисных и негистерезисных амплитудно-зависимых потерь на примере квадратично-нелинейных дефектов
- 1.5 Заключение

ГЛАВА 2. Негистерезисное амплитудно-зависимое поглощение и проблема объяснения приливной модуляции эндогенных сейсмических шумов

- 2.1 Основные особенности наблюдаемой модуляции сейсмических шумов приливыми деформациями
- 2.2 Обоснование привлечения механизма негистерезисного амплитудно-зависимого поглощения для объяснения приливных модуляционных эффектов
- 2.3 Физические механизмы диссипации на дефектах, обладающих высокой чувствительностью к деформации среды
- 2.4 Заключение

ГЛАВА 3. Использование "неклассических" модуляционных эффектов для обнаружения трещиноподобных дефектов в твердотельных образцах

- 3.1 Предельная чувствительность резонансного модуляционного метода обнаружения квадратично-нелинейных трещиноподобных дефектов
- 3.2 Общая характеристика модуляционных взаимодействий высших порядков на трещинах, демонстрирующих неаналитическую нелинейность
- 3.3 Кросс-модуляция и каскадная кросс-модуляция в твердотельных образцах с трещиноподобными дефектами
- 3.4 Каскадная модуляция на неаналитической нелинейности как аналог модуляционного взаимодействия на кубичной нелинейности в случае многочастотной накачки
- 3.5 Заключение

ГЛАВА 4. Нелинейные свойства материалов, содержащих мягкие включения с пороговым поведением

- 4.1 Модель упругой нелинейности порогового происхождения на примере слабосжимаемой среды с тонкостенными микросферами
- 4.2 Предельная величина параметра нелинейности порогового происхождения и ее связь с обычным "контрастно-мягким" механизмом
- 4.3 Экспериментальная демонстрация эффективности порогового механизма
- 4.4 Заключение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ