

На правах рукописи

КОЛЕСНИКОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ
В НЕУПРУГИХ И МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СРЕДАХ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск 2009



Работа выполнена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Гик Леонид Давидович

доктор технических наук, профессор
Глинский Борис Михайлович

доктор технических наук, профессор
Иванов Вадим Васильевич

Ведущая организация:

Институт горного дела СО РАН
(ИГД СО РАН, г. Новосибирск)

Защита состоится 12 ноября 2009 г. в 9:30 на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Учреждении Российской академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

Адрес: пр-т Ак. Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090

Факс: (383)333-25-13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН.

Автореферат разослан 4 августа 2009 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
доктор технических наук



И.Н. Ельцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектом исследования диссертационной работы являются волновые явления в неупругих и метастабильных средах, свойства которых не могут быть адекватно описаны в рамках представлений об идеальной упругости, а также методы изучения таких сред.

Актуальность проблемы. Большинство задач, решаемых сейсмическими методами на разных масштабных уровнях (от геоакустики до сейсмологии), позволяет рассматривать исследуемые объекты в рамках упругих представлений и в предположении о сплошности сейсмогеологических сред. Такая идеализация вполне оправдана до тех пор, пока отличие реальных сред от их упругих моделей не оказывает существенного влияния на точность получаемых результатов. В то же время имеется достаточно широкий класс геоматериалов, неидеальных с позиций теории упругости, свойства которых настолько сильно отличаются от свойств большинства консолидированных горных пород, что их аппроксимация идеально-упругими средами либо заведомо неприемлема из-за кардинальных различий в физике происходящих на микро- и мезоуровне процессов, либо приводит к слишком большим погрешностям в определении искомых параметров.

Из всего многообразия горных пород с неидеальными сейсмическими свойствами можно выделить несколько классов, представляющих интерес с точки зрения практических приложений получаемых для них результатов. Во-первых, это породы, для которых эффекты, связанные с внутренним трением, могут проявляться при инструментальных наблюдениях в реальных условиях. К таким эффектам, кроме повышенного затухания, можно отнести собственную дисперсию скоростей объемных сейсмических волн, влияние контраста поглощающих свойств граничащих сред на процессы отражения-преломления, а также более сложную, чем в упругости, взаимосвязь характеристик объемных волн и волн в объектах с малыми в сравнении с длиной волны размерами (например, в тонких стержнях).

Такие породы, как неконсолидированные грунты, из-за высокой пористости и ослабленных связей между минеральными частицами характеризуются, помимо повышенных поглощающих свойств, сильной зависимостью упругих свойств от напряженно-деформированного состояния и насыщенности флюидами. Кроме того, в грунтах могут распространяться волны, по физической природе существенно отличающиеся от упругих волн в сплошных средах.

Еще один вид неидеально-упругих сред – породы (включая неконсолидированные грунты), находящиеся под действием разрушающих нагрузок, которые на стадии предразрушения приводят к переходу деформируемой среды в метастабильное состояние. Интерес к объектам такого рода обусловлен, в первую очередь, стремлением к разработке эффективных методов мониторинга потенциально опасных геологических объектов и прогноза природных и техногенных катастрофических явлений: оползней, обвалов, землетрясений и т.д. Наибольшие перспективы применения сейсмических методов в этой области связаны с результатами исследований в двух направлениях: первое – изучение зависимостей сейсмических свойств геоматериалов от разрушающих нагрузок, в особенности при их переходе в метастабильное состояние, второе – изучение процессов генерации деформируемыми геоматериалами упругой энергии в виде сейсмоакустической эмиссии.

Изучением особенностей распространения сейсмических волн в неидеально-упругих средах на протяжении нескольких последних десятилетий занимались многие исследователи как в нашей стране, так и за рубежом. Несмотря на это, многообразие таких сред и эффектов, наблюдаемых при их экспериментальных исследованиях, не позволяет считать степень изученности данной проблемы достаточно полной. Получение экспериментальных данных, инициирующих создание адекватных этим данным теоретических моделей и разработку новых способов обработки и интерпретации – один из основных путей развития физических основ и совершенствования сейсмических методов.

Так как горные породы – материалы генетически гетерогенные, в которых трудно полностью исключить влияние на динамические характеристики упругих волн рассеяния упругой энергии на неоднородностях, одним из наиболее эффективных экспериментальных методов изучения волновых явлений в неидеально-упругих средах является их физическое моделирование.

С учетом вышеизложенного представляются **актуальными** исследования волновых явлений в неупругих и метастабильных сейсмогеологических средах, в том числе на их физических моделях, а также разработка и совершенствование методических приемов изучения сейсмических объектов с неидеально-упругими свойствами и определение потенциальных направлений практического применения полученных результатов.

Цель работы – развитие физических основ сейсмических методов изучения строения, состояния и эволюции земных недр путем модели-

рования волновых явлений в неупругих и метастабильных средах, а также разработка и совершенствование методических приемов их исследования.

Основные задачи исследований.

1. Экспериментальное изучение частотных свойств поглощения (в том числе собственной дисперсии скоростей) упругих волн разных типов в модельных материалах и оценка влияния внутреннего трения на результаты определения упругих констант по экспериментальным данным.
2. Определение условий, при которых контраст поглощающих свойств граничащих сред оказывает наиболее сильное влияние на характеристики отраженных и преломленных волн, сопоставление с результатами физического моделирования.
3. Экспериментальное изучение влияния степени влажности ненагруженного песка на его упругие свойства, в том числе эффектов, связанных с действием сил поверхностного натяжения.
4. Выявление основных закономерностей изменения упругих свойств влажных связных и сыпучих грунтов в процессе их сдвигового разрушающего деформирования.
5. Разработка и опробование в натурных экспериментах методики оценки состояния оползнеопасных склонов по поляризационным характеристикам микросейсмического поля.
6. Физическое моделирование волновых полей для сейсмических объектов с неидеально-упругими свойствами, разработка новых методических приемов и рекомендаций по изучению таких объектов.

Фактический материал и методы исследования. Данные физического моделирования сейсмических волновых полей, лабораторных исследований грунтов и натурных экспериментов в основном получены лично автором с помощью компьютеризированных лабораторных установок и полевых регистраторов, разработанных при его непосредственном участии. Натурные эксперименты проводились в основном в горных районах Тянь-Шаня в сотрудничестве с киргизскими коллегами из Института физики и механики горных пород НАН КР, а также в небольшом объеме в Новосибирской области. Кроме этого, в работе использованы записи землетрясений Алтайской региональной сейсмологической сети Геофизической службы СО РАН.

При проведении расчетов, обработке и интерпретации данных использовались программы и алгоритмы, разработанные лично автором, либо при его непосредственном участии.

Основные методы исследования – физическое и численное моделирование, лабораторный и натурный эксперимент. При обработке и интерпретации экспериментальных данных использовались частотная фильтрация, спектральный и поляризационный анализ, статистические методы, аппроксимация данных различными функциями (в том числе, набором комплексных экспонент – методом Прони), алгоритмы оптимизации, сейсмоэмиссионной томографии и др.

Защищаемые научные положения.

1. Аномальный характер обусловленной внутренним трением собственной дисперсии скоростей упругих волн является одной из основных причин несовпадения упругих параметров, измеренных статическими и динамическими методами, что согласуется с полученными на модельных материалах экспериментальными данными.
2. Контраст поглощающих свойств граничащих сред наиболее сильно влияет на коэффициенты отражения и преломления упругих волн при углах падения, близких к критическим (если таковые существуют) и закритическим, что подтверждено результатами физического моделирования.
3. В отсутствие свободной внутриводной воды упругие свойства влажных ненагруженных песчаных грунтов определяются в основном действием сил капиллярного сцепления: уменьшение со снижением влажности менисков на контактах зерен приводит к росту сил капиллярного сцепления, возрастанию скорости и уменьшению поглощения медленной продольной волны, а дальнейшее исчезновение менисков – к ее затуханию.
4. При сдвиговом деформировании влажных глинистых грунтов стадия предразрушения характеризуется резким уменьшением скорости и увеличением поглощения продольных волн; песчаные грунты в нестесненных условиях деформирования ведут себя аналогично, но в стесненных условиях изменение скорости и поглощения имеет прямо противоположный характер, что является следствием дилатантного упрочнения.
5. Напряженно-деформированное состояние пород на оползнеопасных склонах влияет на поляризационные характеристики микросейсмического поля на их поверхности – преимущественная поляризация в направлении падения склона является признаком активизации склоновых процессов.

Научная новизна и личный вклад. В работе получены следующие новые результаты.

1. Показано, что частотные свойства поглощения (в том числе собственная дисперсия скоростей) стержневых и объемных упругих волн описываются функциями одного вида только при равенстве декрементов поглощения P - и S -волн, что необходимо учитывать при интерпретации данных измерений на стержневых образцах.
2. На примере частотно-независимой модели поглощения Кьяртансона, хорошо согласующейся с полученными экспериментальными данными о частотных свойствах поглощения упругих волн в модельных материалах, показано, что аномальный характер собственной дисперсии скоростей упругих волн является одной из основных причин несовпадения упругих констант, измеренных динамическими и статическими методами.
3. Получены формулы для комплексного лучевого параметра и критических углов для плоских неоднородных волн, падающих на границу неупругих сред. Установлено, что наибольшие отличия от коэффициентов, рассчитанных без учета поглощения, наблюдаются при углах, близких к критическим (определенным для упругого случая) и закритических, что подтверждено результатами физического моделирования.
4. В лабораторных экспериментах установлена определяющая роль сил капиллярного сцепления в наблюдаемых изменениях упругих свойств ненагруженного влажного песка при его высыхании.
5. Получены новые данные об особенностях изменения упругих свойств влажных грунтов в процессе сдвигового разрушающего деформирования, установлена дилатантная природа аномального изменения упругих свойств песчаных грунтов на стадии предразрушения в стесненных условиях деформирования.
6. На основе результатов численного моделирования сейсмоакустической эмиссии от формирующейся поверхности скольжения предложена и опробована при проведении натурных экспериментов поляризационная методика оценки устойчивости склонов по микросейсмическому полю.
7. На физических моделях исследовано влияние соотношения скорости звука в скважинном флюиде и сейсмических скоростей в окружающем массиве на точность получаемых по данным акустического каротажа оценок поглощения упругих волн.
8. Предложен новый способ подавления регулярных волн-помех, основанный на их моделировании комплексными экспонентами по методу Прони и последующем вычитании из исходного волнового

поля, его эффективность подтверждена на данных физического моделирования.

9. На результатах физического моделирования показано, что замена монопольных скважинных излучателей и приемников квадрупольными приводит к повышению отношения сигнал/помеха при изучении методом акустического каротажа неизменной части породного массива.
10. Предложен и протестирован на данных физического моделирования способ оценки положения и размеров низкоскоростных высокопоглощающих локальных неоднородностей по координатам интерференционных экстремумов волнового поля.
11. На экспериментальных данных показана эффективность применения итерационной модификации сейсмозмиссионной томографии для локализации сейсмических источников.

Все перечисленные научные результаты получены лично автором, либо при его активном участии.

Научная и практическая значимость. Научная значимость работы определяется, прежде всего, ее направленностью на развитие физических основ сейсмических методов, а именно на получение новых знаний об особенностях распространения упругих волн в неидеально-упругих средах и о зависимости свойств таких сред от различных факторов. На практике полученные результаты могут служить основой для разработки новых и совершенствования уже существующих методов экспериментальных сейсмических исследований, лабораторного эксперимента, обработки и интерпретации сейсмических данных.

Результаты проведенного анализа соотношения параметров объемных и стержневых волн позволяют корректно интерпретировать данные измерений на тонких стержневых образцах материалов с повышенными поглощающими свойствами. Для таких материалов также показано, что собственная дисперсия скоростей упругих волн, которой обычно пренебрегают, должна учитываться при сопоставлении результатов измерений, полученных в разных частотных диапазонах, в частности, при сравнении статических и динамических упругих констант.

Изучение особенностей отражения упругих волн на границах сред, характеризующихся контрастом поглощающих свойств, позволило определить, в каких случаях такой контраст оказывает наибольшее влияние на коэффициенты отражения. Эти особенности должны учитываться при анализе динамических параметров отраженных волн. Показана принципиальная возможность получения достаточно сильных отраже-

ний от границ сред, отличающихся только поглощающими свойствами (например, типа водонефтяного контакта).

Ряд результатов исследования акустических свойств влажных грунтов, в том числе находящихся под действием разрушающих сдвиговых нагрузок, может найти применение при разработке методов оценки устойчивости и мониторинга оползнеопасных склонов. Другой подход к этой проблеме реализован в предложенной и опробованной в натурных экспериментах методике, основанной на изучении поляризации части поля микросейсм, связанной со склоновыми процессами.

Представленные в работе результаты физического моделирования сейсмических волновых полей также могут найти применение в практике сейсмических исследований, проводимых на разных масштабных уровнях (от акустического каротажа до сейсмологии). Эксперименты на моделях скважин показали, в каких случаях определение поглощения сейсмических волн традиционными методами приводит к большим погрешностям, а также позволили сравнить эффективность монопольных и мультипольных скважинных источников и приемников упругих волн в присутствии радиально-измененной прискважинной зоны.

Предложенный способ фильтрации, основанный на моделировании регулярных волн-помех комплексными экспонентами по методу Прони, позволяет эффективно подавлять их даже в тех случаях, когда они по кажущимся скоростям близки к полезным волнам.

Предложен и опробован на данных физического моделирования способ выделения низкоскоростных высокопоглощающих локальных неоднородностей по интерференционным экстремумам волнового поля, который может применяться как экспресс-метод оценки положения и размеров различного рода полостей, очагов вулканов, зон оттаивания и т.д. На физических моделях, в натурном эксперименте и на сейсмологических данных опробована и показала хорошие результаты итерационная модификация алгоритма сейсмозмиссионной томографии, позволяющая локализовать сейсмические источники с использованием непосредственно волновых форм, без снятия времен вступления.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Семинаре "Использование данных ГИС и петрофизики при интерпретации материалов сейсморазведки в условиях Западной Сибири" (Новосибирск, 1988), Конференции "Сейсмические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых" (Киев, 1988), Втором всесоюзном семинаре "Нетрадиционные методы геофизических исследований неодно-

родностей в Земной коре" (Москва, 1991), Международной геофизической конференции и выставке SEG-EАГО (Москва, 1993), Международной конференции "Геодинамика и напряженное состояние недр Земли" (Новосибирск, 1999), Всероссийском семинаре "Методы, технические средства, методика обработки и интерпретации геолого-геофизических исследований при создании государственной сети опорных геофизических профилей" (Новосибирск, 1999), Международной конференции "Проблемы геомеханики и геотехнического освоения горных территорий" (Бишкек, 2000), Неделе горняка-2000 (Москва, 2000), 10, 13, 15, 18 и 20-й сессиях Российского акустического общества (Москва, 2000, 2003; Нижний Новгород, 2004; Таганрог, 2006; Москва, 2008), 1-й Международной школе-семинаре "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород" (Красноярск, 2001), 14-th Geophysical Congress and Exhibition of Turkey (Ancara, Turkey, 2001), Конференции "Проблемы региональной геофизики" (Новосибирск, 2001), Всероссийской научной конференции "Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков" (Иркутск, 2002), 7, 8 и 9-м Семинарах СНГ "Акустика неоднородных сред" (Новосибирск, 2002, 2004, 2006), Международной геофизической конференции "Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия" (Новосибирск, 2003), 10-th European Meeting of Engineering Geophysics (Utrecht, Netherlands, 2004), Международной научной конференции "Сейсмические исследования земной коры" (Новосибирск, 2004), 2-м Международном симпозиуме "Активный геофизический мониторинг литосферы Земли" (Новосибирск, 2005), Третьем международном симпозиуме "Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке" (Бишкек, 2005), 12-th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Helsinki, Finland, 2006), 69-th EAGE Conference and Exhibition (London, Great Britain, 2007), ежегодных школах-семинарах "Геомеханика и геофизика" (Новосибирск, 1999-2005), школе-семинаре "Геодинамика, геомеханика и геофизика" (Стационар "Денисова пещера", Алтайский край, 2008), конференции "Актуальные фундаментальные и прикладные проблемы нефтегазовой геологии, геохимии и геофизики" (Новосибирск, 2009), 71-st EAGE Conference and Exhibition (Amsterdam, Netherlands).

По теме диссертации опубликовано 50 работ, в том числе, в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК – 16 (ж. "Вулканология и сейсмология" – 1, ж. "Геология и геофизика" – 5, ж. "Горный информационно-аналитический бюллетень" – 1, ж. "Доклады Академии Наук" – 1, ж. "Физико-технические проблемы раз-

работки полезных ископаемых" – 1, ж. "Физическая мезомеханика" – 7), в зарубежных изданиях, включенных в систему цитирования Web of Science: Science Citation Index Expanded (база по естественным наукам) – 1 (ж. "Natural Hazards and Earth System Sciences"), коллективная монография – 1, авторское свидетельство на изобретение – 1.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 316 наименований. Полный объем диссертации составляет 307 страниц, включая 102 рисунка и 12 таблиц.

Благодарности. Представленные в диссертации результаты получены в сотрудничестве со многими исследователями как из Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, так и из других организаций. Автор благодарен С.В. Полозову за многолетнее аппаратное обеспечение экспериментальных исследований, Г.Б. Григоряну, А.И. Шерубневу, А.Ю. Игнатову, М.В. Донцову, Д.А. Медных, П.Е. Шубину, С.С. Бороде, принимавшим участие в проведении лабораторных экспериментов на разных этапах работы, Е.А. Хогоеву за помощь в разработке программного обеспечения, М.М. Немировичу-Данченко и Л.А. Назарову за проведенное численное моделирование. Автор выражает благодарность А.Ф. Еманову, В.С. Селезневу, А.Д. Дучкову, О.В. Никольской, К.Ч. Кожогулову за помощь в организации натурных экспериментов. Автор с благодарностью вспоминает своего первого научного руководителя Е.М. Аверко, во многом определившего основное направление его научной деятельности.

Особенно признателен автор академику С.В. Гольдину за поддержку при проведении исследований, конструктивные предложения и ценные советы при планировании экспериментальных работ, а также полезные обсуждения полученных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследований, перечислены защищаемые научные положения, определены новизна и личный вклад, научная и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена исследованию влияния внутреннего трения на упругие свойства материалов.

В разделе 1.1 дан обзор опубликованных экспериментальных данных о частотных свойствах поглощения упругих волн в горных породах, под которыми понимаются как зависимости от частоты коэффициентов

и декрементов поглощения, так и обусловленная внутренним трением собственная дисперсия сейсмических скоростей.

Анализ как обзорных работ [Васильев, 1962; Knopoff, 1964; Attewell and Ramana, 1966 и др.], так и большого числа опубликованных результатов, в том числе полученных для одних и тех же пород на различающихся на несколько порядков частотах [Меркулова, 1966, 1968; Меркулова и Васильцов, 1967; Tittmann et al., 1981; Murphy, 1982; Bulau et al., 1984 и др.], указывает на пропорциональность коэффициентов поглощения частоте и постоянство декрементов поглощения в горных породах в диапазоне от единиц герц до мегагерц.

Отклонения от указанных закономерностей наблюдаются в основном на очень высоких частотах, когда существенной становится роль рассеяния на неоднородностях, и в экспериментах с насыщенными тонкими стержнями, где наблюдаются частотные пики поглощения, связанные, как показано в работах [Dunn, 1986, 1987; White, 1986], с вязким течением флюида через открытые поры на границе порода-воздух.

Немногочисленные данные о собственной дисперсии сейсмических скоростей, полученные как в натуральных, так и в лабораторных условиях, показывают, что она имеет аномальный характер, т.е. с увеличением частоты скорости возрастают с постепенно уменьшающимся градиентом.

Ряд феноменологических моделей поглощения имеют подобные частотные свойства [Kolsky, 1956; Lomnitz, 1957, 1962; Futterman, 1962; Азими и др., 1968 и др.]. В данной работе для анализа и сравнения с экспериментальными данными использовалась модель, предложенная Кьяртансоном [Kjartansson, 1979], которая при постоянном во всем частотном диапазоне декременте поглощения $\theta(f) = \text{const}$ характеризуется свойствами как линейности, так и причинности. Дисперсия фазовой скорости в модели Кьяртансона описывается выражением

$$c(f) = c_0 (f/f_0)^\beta, \quad (1)$$

где $\beta \approx \theta/\pi^2$, c_0 – скорость на произвольной опорной частоте f_0 .

В разделе 1.2 приведены результаты исследования частотных свойств поглощения продольных и поперечных волн в модельных материалах – винипласте, плексигласе, менделеевской замазке и пластилине. В сравнении с горными породами эти материалы можно считать практически сплошными и однородными, поэтому эффекты, связанные с рас-

сеянием, на характерных для модельных экспериментов длинах волн практически не проявляются.

Измерения проводились импульсным методом по профильной методике. Параметры продольных волн определялись при прозвучивании объемных образцов под углом 45° [Шамина, 1959]. Параметры поперечных (крутильных) волн изучались на тонких относительно длины волны λ стержневых образцах (для всех частот выполнялось условие $R/\lambda < 0.05$, где R – радиус стержня).

После вычисления для всех точек профиля спектров зарегистрированных импульсов логарифмы исправленных за геометрическое расхождение амплитуд и исправленные за фазовые сдвиги времена вступления для каждой i -й частотной составляющей аппроксимировались по методу наименьших квадратов функциями $\ln A_i(r) = \ln A_{0i} - \alpha_i r$ и $t_i(r) = r/c_i$ в предположении об экспоненциальном характере затухания и монотонно нарастающей временной задержке вдоль профиля. В результате получались частотные зависимости для фазовых скоростей $c_i = c(f_i)$, коэффициентов $\alpha_i = \alpha(f_i)$ и логарифмических декрементов $\theta_i = \alpha_i c_i / f_i$ поглощения. Погрешности при определении скоростей не превышали 0.1 %, а при определении коэффициентов и декрементов поглощения они составляли порядка первых процентов на верхних и не более 10 % на нижних границах исследуемых частотных диапазонов.

Как показали проведенные эксперименты, во всех случаях частотные свойства поглощения продольных и поперечных волн в модельных материалах хорошо согласуются с моделью Кьяртансона. Пример экспериментальных данных и их аппроксимации моделью Кьяртансона для поперечных волн в винипласте приведен на рис. 1а.

В разделе 1.3 проведен сравнительный анализ частотных свойств поглощения объемных P - и S -волн и низших продольных нормальных волн в тонких по отношению к длине волны стержнях (стержневых волн), часто используемых для лабораторного изучения поглощения упругой энергии в горных породах. Для анализа использовались известные из теории упругости формулы, с учетом того, что линейно-неупругие среды характеризуются комплексными скоростями

$$C_q = C'_q + jC''_q = c_q \left(1 + j\theta_q/2\pi\right) / \left(1 + \theta_q^2/4\pi^2\right), \quad (2)$$

где индекс q указывает на тип волны.

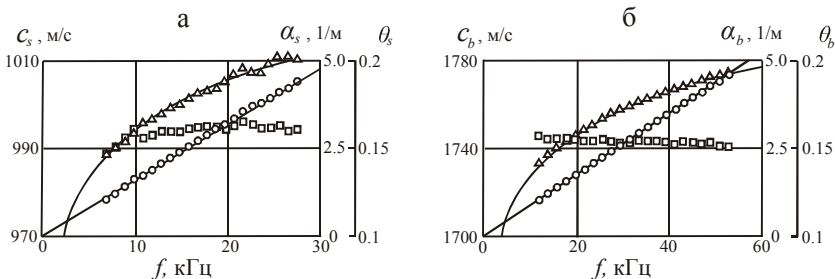


Рис. 1. Экспериментальные данные для крутильных (а) и продольных (б) низших нормальных волн в стержне из винипласта.

Треугольные маркеры – фазовые скорости, круговые – коэффициенты и квадратные – декременты поглощения, сплошные линии – аппроксимация моделью Кьяртансона.

На примере модели Кьяртансона с использованием формализма комплексных скоростей показано, что частотные свойства поглощения стержневой волны могут отличаться от таковых для объемных волн. Однако при равенстве декрементов θ_p и θ_s наблюдается не только подобие частотных свойств поглощения объемных и стержневых волн, но и совпадение декрементов всех типов волн.

Эти выводы косвенно подтверждены экспериментально на модельных материалах – винипласте и плексигласе. Полученные для них экспериментальные данные для стержневых волн (пример для винипласта приведен на рис. 1б) также хорошо аппроксимируются моделью Кьяртансона, что согласуется с близкими значениями измеренных декрементов поглощения стержневых и поперечных волн (для винипласта $\theta_b = 0.154$, $\theta_s = 0.159$, для плексигласа $\theta_b = 0.078$, $\theta_s = 0.083$).

В разделе 1.4 анализируется влияние собственной дисперсии сейсмических скоростей на результаты определения упругих параметров материалов. Известно, что упругие константы, измеренные динамическими и статическими методами, для многих пород не совпадают [Никитин, 1962; Ржевский и Новик, 1978; Савич и Яценко, 1979 и др.]. Экспериментальные динамические упругие модули, как правило, больше статических, а динамический коэффициент Пуассона может быть как больше, так и меньше статического [Tutuncu et al., 1998].

В работе приведены оценки влияния собственной дисперсии сейсмических скоростей на результаты определения упругих параметров в разных частотных диапазонах. Анализ проводился в рамках модели Кьяртансона, хотя подобные результаты могут быть получены для лю-

бой из упоминавшихся в разделе 1.1 феноменологических моделей. Если дисперсия скоростей P - и S -волн описывается формулами вида (1), можно по известным из теории упругости формулам для модулей сдвига μ , Юнга E и всестороннего сжатия K получить выражения для их отношений на двух частотах. При равенстве декрементов поглощения $\theta_p = \theta_s = \theta$ для всех модулей это отношения вида:

$$M(f)/M(f_0) = (f/f_0)^{2\theta/\pi^2}, \quad (3)$$

где M имеет смысл любого из трех упругих модулей.

Согласно этой формуле, при понижении частоты упругие модули уменьшаются с постепенно нарастающим градиентом. Например, при уменьшении частоты на девять порядков, что соответствует переходу от мегагерцового (динамического) к миллигерцовому (квазистатическому) диапазону, модель Кьяртансона предсказывает понижение упругих модулей для материалов с декрементами поглощения порядка 0.2 почти на 60%. При $\theta_p \neq \theta_s$ отношения для модулей E и K на двух частотах описываются более сложными, чем правая часть (3), функциями, зависящими от θ_s для E и θ_p для K , а также от разности декрементов $\Delta = \theta_s - \theta_p$ и отношения скоростей $\gamma_0 = c_{0s}/c_{0p}$ на опорной частоте f_0 . Но характер изменения E и K с частотой сохраняется.

Отношение коэффициента Пуассона ν на двух частотах зависит от разности декрементов Δ и отношения скоростей γ_0 :

$$\nu(f)/\nu(f_0) = \left(1 - 2\gamma_0^2 \tilde{f}^{2\Delta/\pi^2}\right) (1 - \gamma_0^2) / \left[\left(1 - \gamma_0^2 \tilde{f}^{2\Delta/\pi^2}\right) (1 - 2\gamma_0^2) \right],$$

где $\tilde{f} = f/f_0$. Как следует из этой формулы, при $\theta_p = \theta_s$ коэффициент Пуассона становится частотно-независимым, как и в случае идеальной упругости.

При переходе от мегагерцового к миллигерцовому диапазону ν также может изменяться на несколько десятков процентов. Кардинальное отличие от упругих модулей состоит в том, что в зависимости от знака Δ с уменьшением частоты ν может как убывать, так и возрастать, что согласуется с экспериментальными данными о различии статических и динамических коэффициентов Пуассона для горных пород [Tutuncu et al., 1998]. Согласно модели Кьяртансона, при уменьшении частоты ν убывает, если $\theta_p > \theta_s$, и возрастает при $\theta_p < \theta_s$.

В пользу того, что аномальный характер собственной дисперсии сейсмических скоростей является одной из основных причин наблюдаемых в экспериментах различий упругих констант, измеренных статическими и динамическими методами, говорит сравнение динамического модуля Юнга винипласта, вычисленного по приведенным на рис. 1б экспериментальным данным для стержневой скорости, со статическим модулем, измеренным при растяжении образца на прессе (рис. 2).

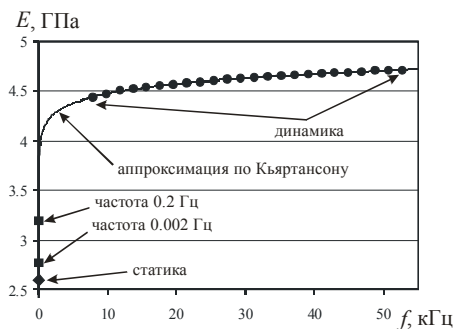


Рис. 2. Экспериментальная зависимость (круговые маркеры) динамического модуля Юнга винипласта от частоты и ее аппроксимация согласно модели Кьяртансона (сплошная линия и квадратные маркеры) в сравнении с определенным экспериментально статическим модулем Юнга (ромбический маркер).

В разделе 1.5 рассмотрены особенности определения упругих свойств высокопоглощающих материалов по измерениям в тонких стержнях. Показано, что приближенные формулы, обычно применяемые для определения поглощения P -волн по данным о поглощении крутильных и продольных нормальных волн в тонких стержнях, в таких материалах могут приводить к большим погрешностям. Для высокопоглощающих материалов пересчет должен производиться по точным формулам, полученным из известных из теории упругости соотношений, связывающих скорости объемных и стержневых волн, с учетом их комплексного характера (2).

Предложены методические приемы определения упругих констант высокопластичных материалов, для которых применение традиционных статических методов затруднено из-за низких пределов упругости, а динамических – из-за повышенного поглощения S -волн. На примере модельного материала (пластилина) показано, что хорошие результаты в таких случаях можно получить по измерениям на объемных и стержневых продольных волнах. При этом из-за различия используемых частотных диапазонов (килогерцовый для стержневых и мегагерцовый для P -волн) необходимо компенсировать влияние дисперсии скоростей.

Полученные для пластилина результаты показали, что его модули сдвига, Юнга и всестороннего сжатия с повышением частоты растут, а коэффициент Пуассона убывает, что и предсказывается моделью Кьяртансона, так как в пластилине $\theta_p < \theta_s$ ($\theta_p = 0.21$, $\theta_s = 0.89$).

Во второй главе исследуется влияние контраста поглощающих свойств граничащих сред на коэффициенты отражения и преломления упругих волн.

В разделе 2.1 рассмотрен общий случай наклонного падения плоской неоднородной волны на плоскую границу раздела поглощающих сред. Применявшийся для расчета коэффициентов отражения-преломления алгоритм основан на том, что и для таких границ можно использовать аппарат, разработанный для упругости, имея в виду, что в этом случае комплексными становятся как скорости, так и лучевой параметр p , одинаковый, согласно закону Снеллиуса, для всей системы связанных с границей волн [Аки и Ричардс, 1983].

В работе получена формула для комплексного лучевого параметра p , связывающая его с углом падения β_q и углом неоднородности γ_q (углом между направлениями распространения и максимального затухания) падающей неоднородной волны, а также со скоростью c_q и декрементом поглощения θ_q волн данного типа в среде, из которой происходит падение:

$$p = \frac{\sqrt{W_q + (1 - \delta_q^2)} \sin \beta_q - j \sqrt{W_q - (1 - \delta_q^2)} \sin (\beta_q - \gamma_q)}{c_q \sqrt{2}},$$

где $W_q = \sqrt{(1 - \delta_q^2)^2 + 4\delta_q^2 / \cos^2 \gamma_q}$, $\delta_q = \theta_q / 2\pi$, индекс q указывает на тип волны.

Методика расчетов сводится к вычислению лучевого параметра для падающей волны, по которому определяются необходимые для дальнейших вычислений комплексные синусы и косинусы, после чего коэффициенты отражения-преломления рассчитываются по известным из теории упругости формулам, в которых входящие в них величины заменяются их комплексными аналогами.

В разделе показано, что в поглощающих средах необходимо учитывать неоднородность волн, так как даже однородная волна, падающая на контрастную по поглощению границу (например, на подошву зоны малых скоростей), преобразуется на ней в неоднородные волны, углы не-

однородности γ_q которых могут становиться достаточно большими уже при небольших углах падения. Получена формула для критических углов, согласно которой, в отличие от упругости, для волн, образующихся на границе неупругих сред, могут существовать как один, так и два критических угла, но при определенных условиях таких углов может и не быть, даже если скорость вторичной волны больше скорости волны падающей.

Проведенные расчеты для различных соотношений параметров граничащих сред показали, что, в сравнении со случаем идеальной упругости, модули и аргументы коэффициентов для границ поглощающих сред с изменением угла падения меняются более плавно и не имеют разрывов и изломов. Наибольшие отличия коэффициентов отражения-преломления для поглощающих сред от рассчитанных без учета поглощения наблюдаются при углах, близких к критическим (определенным для упругости) и закритическим. Если таковые не существуют, коэффициенты для упругих и неупругих сред отличаются незначительно. Увеличение угла неоднородности падающей волны γ_q может как увеличивать, так и уменьшать отличия коэффициентов для упругих и неупругих сред, в зависимости от знака угла γ_q .

В разделах 2.2 и 2.3 проанализированы два частных случая – нормальное падение однородных волн и наклонное падение на границу сред, контрастных только по поглощению. Показано, что при нормальном падении однородных волн влияние поглощения на коэффициенты отражения наиболее заметно при близких акустических жесткостях граничащих сред. Модули коэффициентов отражения при нормальном падении возрастают с увеличением контраста граничащих сред по поглощению.

Граница сред, различающихся только поглощающими свойствами, представляет интерес, в частности, как модель водонефтяного контакта, так как различия водо- и нефтенасыщенных пород по скоростям и плотностям невелики, а по поглощению могут быть значительными. Расчеты показали, что от таких границ могут быть получены достаточно сильные отражения, в особенности для монотипных волн при больших углах падения.

В разделе 2.4 приведены результаты экспериментального исследования отражения ультразвуковых импульсов от границы воды с двумя модельными материалами, один из которых (плексиглас) имитирует слабопоглощающую среду, а второй (пластилин) – среду с повышенными

ми поглощающими свойствами. Эксперименты проводились по импульсной методике в мегагерцовом диапазоне частот. Конструкция экспериментальной установки с рычажным устройством, позволяющим изменять угол отражения, сохраняя направленность источника и приемника на площадку отражения и длину луча отраженной волны, компенсировала влияние на результаты измерений геометрического расхождения и диаграмм направленности датчиков.

Для определения зависимостей коэффициентов отражения от угла падения ультразвуковые импульсы, отраженные под разными углами от границы воды с модельными материалами, сравнивались во временной или спектральной области с импульсами, прошедшими через воду без отражения расстояние, равное длине луча отраженной волны.

Экспериментальные данные для границы вода-плексиглас хорошо согласуются с теоретическими кривыми как с учетом поглощения, так и без него (рис. 3а). Для границы вода-пластилин (резкий контраст по поглощению) расчеты для упругого случая приводят к большим ошибкам в области критического и закритических углов, а кривая, рассчитанная с учетом поглощения, хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 3б).

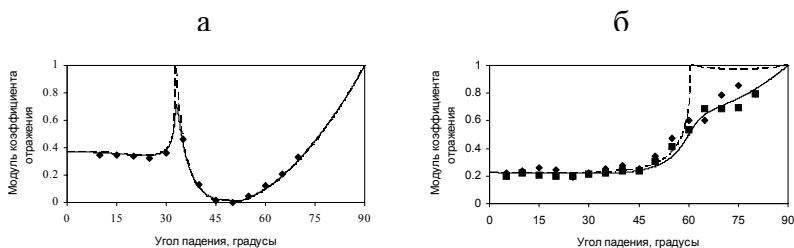


Рис. 3. Экспериментальные (отдельные точки) и теоретические (сплошные линии – с учетом поглощения, штриховые – для упругости) зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения для границ вода-плексиглас (а) и вода-пластилин (б).

В третьей главе приведены экспериментальные данные об аномальных упругих свойствах влажных сыпучих грунтов.

В разделе 3.1 представлены результаты экспериментов по изучению упругих свойств ненагруженного песка при изменении его влажности от полностью насыщенного до сухого состояния. Ранее в экспериментах [Paterson, 1956; Ивакин, 1969; Вильчинская, 1982] было установлено, что в нагруженных насыщенных сыпучих грунтах, в отличие от связных

грунтов, могут распространяться две продольные волны – высокочастотная быстрая и низкочастотная медленная. Однако в ненагруженной полностью насыщенной гранулированной среде из-за отсутствия жестких контактов между твердыми частицами может распространяться только быстрая волна – волна первого рода по терминологии Био [Johnson and Plona, 1982].

Проведенные эксперименты позволили установить, что и в ненагруженном влажном песке может распространяться медленная продольная волна. В экспериментах речной песок с размерами частиц менее 0.5 мм и пористостью 36%, помещенный в пенопластовый контейнер, прозвучивался ультразвуковыми импульсами на базе 20 мм. Первое измерение производилось в полностью насыщенном песке, затем свободная внутриводная вода удалялась через небольшие задранированные мелкой капроновой сеткой отверстия в дне контейнера, и далее измерения проводились в течение 36 суток – до полного высыхания образца.

Эксперимент показал (рис. 4), что при постепенном высыхании песка быстрая высокочастотная волна постепенно затухает, и в определенном диапазоне влажности (наиболее заметно при насыщенности порядка 5-10%) регистрируется медленная низкочастотная волна, скорость, амплитуда и видимая частота которой с уменьшением влажности постепенно возрастают, но затем эта волна также затухает.

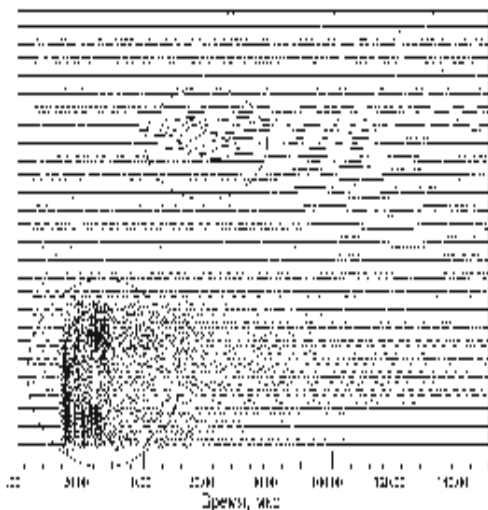


Рис. 4. Ультразвуковая сейсмограмма, полученная при прозвучивании песка от полностью насыщенного водой (нижняя трасса) до сухого (верхняя трасса) состояния; нижним эллиптическим контуром отмечена область регистрации быстрой, верхним – медленной продольной волны.

Так как высыхание действует на параметры медленной волны подобно возрастающей нагрузке, была предложена гипотеза, что это связано с возрастанием контактной упругости зерен песка под действием сил капиллярного сцепления. В пользу этой гипотезы говорит то, что в аналогичном эксперименте с песком, насыщенным этиловым спиртом, поверхностное натяжение которого в 3.3 раза меньше, чем у воды, при сравнимых скоростях звука, плотностях и вязкостях, медленная волна не наблюдалась.

Полученные с использованием формулы для силы капиллярного сцепления между двумя шарообразными частицами [Найдич и др., 1965] оценки показали, что эта сила возрастает при уменьшении размеров мениска жидкости вокруг контакта частиц и краевого угла смачивания (рис. 5). Вызванные силами капиллярного сцепления нормальные напряжения могут достигать нескольких сотен паскалей и более. Исчезновение менисков при низких значениях влажности приводит к постепенному уменьшению суммарного действия сил капиллярного сцепления и, как следствие, к затуханию медленной волны.

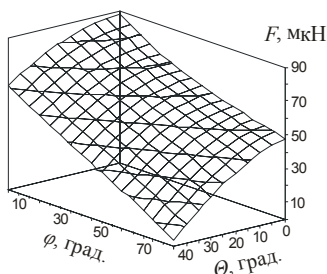


Рис. 5. Зависимость силы капиллярного сцепления F двух контактирующих сферических частиц от угла φ между направлениями из центра частицы на центр мениска и его край и краевого угла смачивания Θ для частиц радиуса 0.2 мм.

В разделе 3.2 на экспериментальных данных, полученных на той же установке и по той же методике, что и эксперименты, описанные в разделе 2.4, показано, что коэффициент отражения от границы воды с насыщенным песком не согласуется с теоретическими кривыми, рассчитанными как для упругих, так и для неупругих сплошных сред – экспериментальные коэффициенты отражения даже при докритических углах падения существенно (до 25%) меньше теоретических. Однако согласие с теоретическими кривыми на докритических углах становится хорошим, если расчеты проводить для плотности сухого песка. Предложена гипотеза о том, что это связано с высокой проницаемостью песка, вследствие которой поровая вода в его приграничном слое колеблется син-

фазно с граничащей водой, не влияя, таким образом, на процесс отражения.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на поиск прогностических признаков активизации склоновых процессов, и предложены методические приемы, которые могут быть использованы для оценки состояния горных склонов и мониторинговых наблюдений на потенциально оползнеопасных участках. Поскольку сдвиговые напряжения – один из основных факторов, приводящих к активизации оползневых процессов, основное внимание уделено влиянию сдвигового деформирования на происходящие в грунтах волновые явления, в особенности при их переходе в метастабильное состояние (на стадии предразрушения).

В разделе 4.1 исследуются упругие свойства песчаных и глинистых грунтов в условиях разрушающего сдвигового деформирования. Эксперименты проводились на установках, позволяющих создавать срезающие сдвиговые нагрузки в среднем сечении образцов с их периодическим импульсным ультразвуковым прозвучиванием в перпендикулярном плоскости среза направлении. База измерений составляла 20 мм, преобладающие частоты импульсов – от нескольких килогерц до нескольких десятков килогерц.

В основной серии экспериментов были реализованы стесненные условия деформирования – при синхронном квазилинейном (ступенчатом) увеличении касательной и нормальной нагрузок последняя непосредственно на образец не действовала, лишь препятствуя увеличению его объема вследствие дилатантного расширения грунта.

Эксперименты показали, что в стесненных условиях изменение скоростей и затухания продольных волн с ростом касательных напряжений в глинистых и песчаных грунтах происходит по-разному (рис. 6), хотя графики, показывающие относительное смещение вдоль плоскости среза, как и диаграммы напряжение-деформация, для них имеют подобный вид.

Если в глинистых грунтах увеличение касательных нагрузок приводит к снижению скорости и возрастанию затухания вследствие разрывов связей между частицами грунта, то в песке эти зависимости имеют прямо противоположный характер, что связано с его дилатантным упрочнением при сдвиге, сопровождающемся выдавливанием межзеренных пленок воды. В глинистых грунтах при возрастании нагрузок происходит обеднение высокочастотной части спектров ультразвуковых импульсов, а в песке – расширение спектров в сторону высоких частот.

Наиболее резкие изменения наблюдаются на стадии предразрушения, то есть когда грунты переходят в метастабильное состояние.

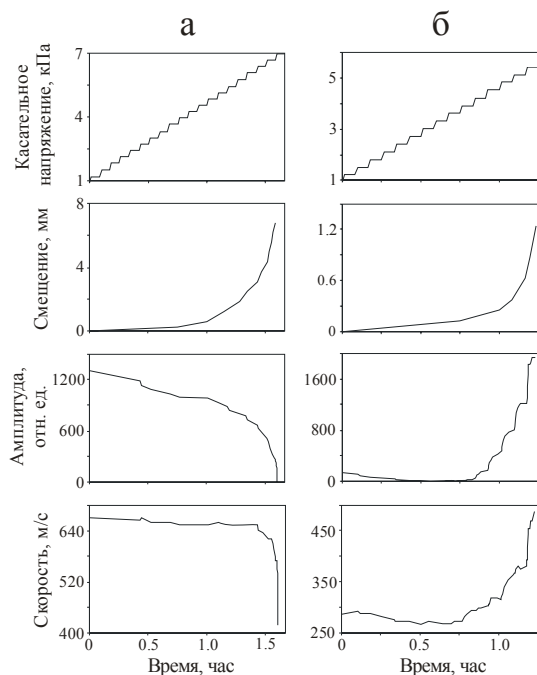


Рис. 6. Экспериментальные данные, полученные при сдвиговом разрушающем деформировании образцов грунтов.

а – глина с весовой влажностью 20%; б – песок с весовой влажностью 16%.

Подтверждает дилатантную природу аномального поведения песчаных грунтов и эксперимент с независимым изменением нормальных и касательных нагрузок. В этом эксперименте уменьшение первоначально приложенной к образцу нормальной ограничивающей (не действующей непосредственно на образец) нагрузки при неизменном касательном напряжении привело к сопровождающемуся понижением скорости и возрастанием затухания продольной волны снижению прочности образца и последующему его разрушению.

Полученные экспериментальные закономерности указывают на перспективность использования активных сейсмических методов для мониторинга и оценки состояния оползнеопасных склонов.

В разделе 4.2 описана методика оценки состояния оползнеопасных склонов по поляризационным характеристикам микросейсмического поля.

При проведении пассивных сейсмических наблюдений на оползневых склонах было замечено, что имеются отличия в поляризации микросейсм на активных и стабильных участках склонов [Меркулов и др., 1997]. На результатах численного моделирования, проведенного в рамках предложенной в работе [Немирович-Данченко, 1998] модели гипотупругой хрупкой среды, в работе показано, что образующиеся при формировании поверхности скольжения трещины сдвига излучают упругую энергию в виде сейсмоакустической эмиссии, которая приводит к колебаниям грунта на дневной поверхности, поляризованным преимущественно в направлении падения склона.

На этой особенности основана предложенная поляризационная методика оценки состояния горных склонов по трехкомпонентным записям поля микросейсм. По результатам опытных работ в горах Северного Тянь-Шаня определен частотный диапазон (примерно от 100 до 200 Гц), наиболее информативный для анализа сейсмоакустической эмиссии на оползнеопасных участках склонов. На более низких частотах закономерной поляризации микросейсм обнаружить не удастся (рис. 7).

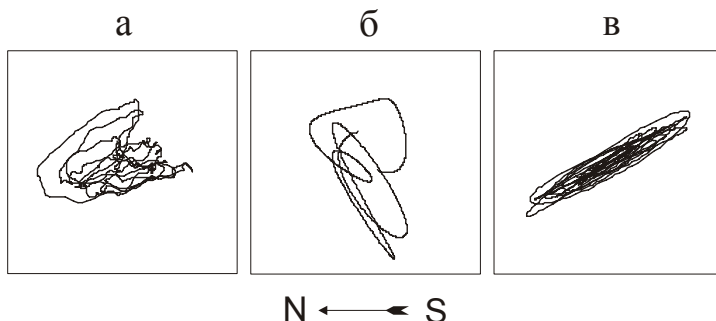


Рис. 7. Проекция на горизонтальную плоскость траектории движения для одной из точек наблюдений, полученные по записям микросейсм без фильтрации (а) и после фильтрации полосовыми фильтрами 10-45 Гц (б) и 120-210 Гц (в).

Согласно предложенной методике, при обработке зарегистрированных на склоне трехкомпонентных сейсмических записей в пределах указанного выше диапазона выбирается полоса частот, в которой отсутствуют квазигармонические колебания техногенного происхождения, проводится соответствующая полосовая фильтрация и поляризационный анализ записей. Повышенная поляризация колебаний в направлении падения склона указывает на его потенциально оползнеопасные участки,

а повторные наблюдения могут дать информацию об активизации или стабилизации склона. Обработка данных, полученных на оползневых склонах в горах Северного Тянь-Шаня, показала перспективность предложенной поляризационной методики оценки состояния склонов по микросейсмическому полю.

В пятой главе приведены результаты физического моделирования неидеальных сейсмических объектов и методов их изучения.

В разделе 5.1 представлены результаты физического моделирования волновых полей в заполненных жидкостью скважинах при различных соотношениях сейсмических скоростей c_p и c_s в твердой среде и скорости звука c_0 в скважинной жидкости. Цилиндрическая скважина в блоке из плексигласа поочередно заполнялась глицерином ($c_s < c_0 < c_p$), водой ($c_0 \approx c_s$) и перхлорметаном ($c_0 < c_s$), что моделировало низко-, средне- и высокоскоростной разрезы. Еще одна модель (скважина в блоке из пластилина, заполненная водой, $c_s < c_0 < c_p$) имитировала низкоскоростной массив с повышенными поглощающими свойствами. Пьезокерамический источник устанавливался в скважине неподвижно, а приемник при профилировании передвигался вдоль ее оси. Как источник, так и приемник располагались на оси скважины.

Обработка ультразвуковых сейсмограмм по описанной в разделе 1.2 методике показала, что если в высоко- и среднескоростных разрезах могут быть получены удовлетворительные оценки поглощения продольных волн, по крайней мере, на близких к максимумам спектров частотах, то в низкоскоростных разрезах поглощение определяется с большими погрешностями – до сотен процентов (рис. 8).

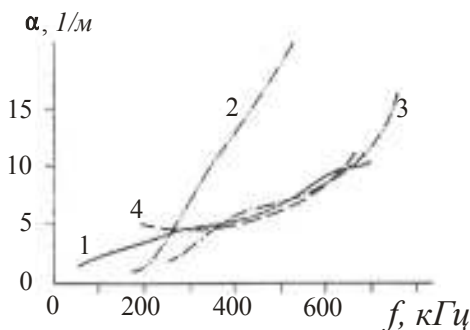


Рис. 8. Экспериментальные зависимости коэффициентов поглощения от частоты.

1 – плексиглас (прозвучивание), 2 – плексиглас-глицерин, 3 – плексиглас-вода, 4 – плексиглас-перхлорметан.

Разложение волновых полей на составляющие их волны по методу Прони [Марплъ-мл., 1990] позволило установить, что причина этого в том, что в таких средах основной вклад в энергию волнового пакета в области первых вступлений вносят продольные просачивающиеся нормальные моды (рис. 9), что приводит к искажению получаемых оценок поглощения.

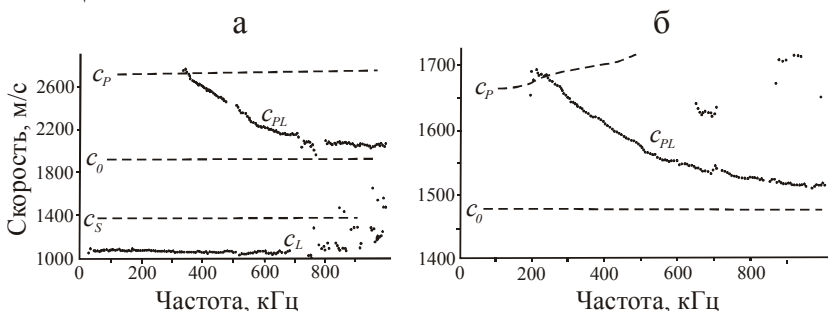


Рис. 9. Фазовые скорости, полученные при обработке скважинных данных по методу Прони (отдельные точки) и по данным прозвучивания объемными волнами (штрих) для моделей плексиглас-глицерин (а) и пластилин-вода (б).

Индексы типов волн: P – продольная, S – поперечная, θ – звука в жидкости, L – Лэмба-Стоунли; PL – низшая продольная просачивающаяся нормальная мода.

В разделе 5.2 описан алгоритм подавления регулярных волн-помех, основанный на оценке параметров интерферирующих волн методом Прони и последующем вычитании волн-помех из исходного волнового поля.

Алгоритм позволяет отфильтровывать волны-помехи (при условии прямолинейности их годографов и близком к экспоненциальному характере затухания) даже если они вследствие дисперсии близки к полезным волнам по кажущимся скоростям и частотному составу, т.е. в тех случаях, когда другие методы фильтрации малоэффективны. Эффективность алгоритма продемонстрирована на данных физического моделирования, полученных для скважинных (рис. 10) и поверхностных наблюдений.

В разделе 5.3 представлены результаты физического моделирования волновых полей в скважине, окруженной имитирующей измененную прискважинную зону цилиндрической радиальной неоднородностью, с источниками и приемниками разного типа. Установлено, что в присутствие такой зоны квадрупольные источники и приемники пред-

почтительнее монопольных, так как при их использовании понижается отношение амплитуд волны, распространяющейся вдоль стенки скважины, и волны, проходящей через неизменный массив, что фактически увеличивает отношение сигнал/помеха при изучении свойств неизменной части массива.

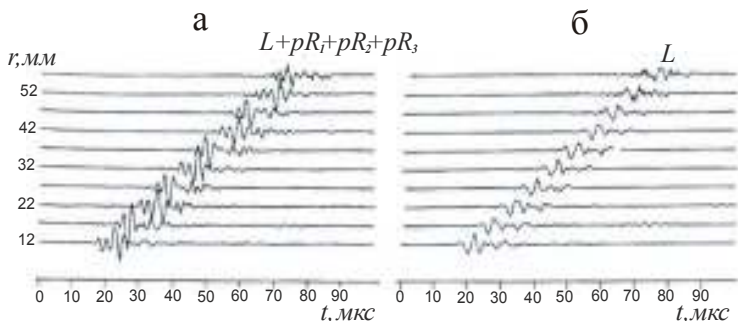


Рис. 10. Ультразвуковая сейсмограмма, полученная на модели плексиглас-перхлорметан (а), и результат подавления превдорэлеевских волн (б).
Индексы типов волн: pR_1 , pR_2 , pR_3 – превдорэлеевские, L – Лэмба-Стоунли.

В разделе 5.4 описан способ оценки координат и размеров низкоскоростных высокопоглощающих локальных (сравнимых с длиной волны) неоднородностей по интерференционным экстремумам волнового поля, наблюдаемых при их сейсмическом просвечивании. Способ основан на предположении о том, что различия в скоростях и поглощении для неоднородности и вмещающей среды таковы, что в первых вступлениях в зоне тени регистрируются дифрагированные волны, либо их амплитуда существенно превышает амплитуду волн, проходящих через неоднородность.

Как показали результаты физического моделирования, при сейсмическом просвечивании таких неоднородностей на профиле наблюдений в области первых вступлений наблюдаются амплитудные экстремумы, вызванные интерференцией волн разных типов. Идея предложенного способа состоит в том, что для тел простой формы (типа круга, щели или эллипса для двумерного случая), аппроксимирующих реальные неоднородности, положение интерференционных экстремумов на профиле наблюдений можно легко рассчитать.

Тогда для оценки геометрических характеристик локальной неоднородности можно минимизировать целевую функцию вида

$$F(\bar{\theta}) = \sum_{i=1}^N [x_i - \tilde{x}_i(\bar{\theta})]^2,$$

где $\bar{\theta}$ – вектор геометрических характеристик эффективной модели неоднородности (например, для эллипса координаты центра, две полуоси и угол наклона одной из них); x_i – координаты наблюдаемых интерференционных экстремумов на профиле; $\tilde{x}_i(\bar{\theta})$ – координаты экстремумов, рассчитанные для модели локальной неоднородности; N – число используемых экстремумов.

При тестировании способа на ультразвуковых данных, полученных для девяти моделей по пяти профилям для каждой модели, средние погрешности для координат центров неоднородностей составляли несколько процентов, а для их размеров не превышали 20%.

В разделе 5.5 иллюстрируются возможности применения метода сейсмоэмиссионной томографии для определения координат сейсмических источников.

Описана разработанная итерационная модификация алгоритма сейсмоэмиссионной томографии. Основная ее особенность в том, что на каждой последующей итерации центр области сканирования, в которой по полученным на площадной системе наблюдений записям сигналов от источника вычисляется коэффициент подобия S , смещается в точку максимального S , определенного на предыдущем шаге. Размеры области и шаг сканирования при этом уменьшаются вдвое, что позволяет существенно повысить точность и быстродействие алгоритма.

Тестирование метода на данных ультразвукового моделирования и натурального эксперимента показало, что координаты источников, расположенных на глубинах меньше поперечных размеров площадной системы наблюдений, определяются с точностью порядка первых процентов. Данный алгоритм применялся при обработке записей афтершоков сильного ($M_s = 7.3$) Чуйского землетрясения 2003 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования волновых явлений в средах, адекватное описание которых затруднено или невозможно в рамках представлений об идеальной упругости. Эксперименты на образцах горных пород при исследованиях такого рода не всегда дают удовлетворительные результаты, так как горные породы – материалы

генетически неоднородные, вследствие чего изучаемые эффекты могут осложняться или даже маскироваться эффектами, связанными с неоднородностью образцов. Этим обусловлен выбор физического моделирования в качестве одного из основных методов экспериментальных исследований, составляющих основу данной работы. Из основных результатов, представленных в работе, можно выделить следующие.

На примере хорошо согласующейся с экспериментальными данными частотно-независимой модели поглощения Кьяртансона, а также на модельных материалах показано, что одной из основных причин наблюдаемых в экспериментах различий упругих констант, измеренных динамическими и статическими методами, является собственная дисперсия сейсмических скоростей.

Установлено, что наиболее сильно поглощение влияет на величину коэффициентов отражения и преломления при углах падения, близких к критическим и закритическим. При больших углах падения могут быть получены интенсивные отражения от границ раздела сред, отличающихся только поглощающими свойствами.

Экспериментально показано, что силы капиллярного сцепления при небольших насыщениях приводят к упрочнению влажного песка, вследствие чего даже в ненагруженном песке может распространяться медленная продольная волна, в то время как при больших насыщениях упругая энергия в нем распространяется в основном в виде быстрой продольной волны. Обнаружен эффект аномального изменения упругих свойств песчаных грунтов при сдвиговом деформировании в стесненных условиях (возрастание скорости и снижение поглощения продольных волн), связанный с их дилатантным упрочнением. Установлено, что наиболее резкие изменения упругих свойств грунтов происходят на стадии предразрушения.

На основе результатов численного моделирования сейсмоакустической эмиссии, вызванной образованием трещин при формировании поверхности скольжения, предложена поляризационная методика оценки устойчивости горных склонов.

На физических моделях отработаны новые методические приемы, позволяющие повысить информативность и достоверность данных акустического каротажа. Предложен способ фильтрации, позволяющий подавлять регулярные волны-помехи, даже если они вследствие дисперсии скоростей близки к полезным волнам по кажущимся скоростям и частотному составу, т.е. в тех случаях, когда другие методы фильтрации малоэффективны.

Предложен и протестирован на данных физического моделирования способ оценки положения и размеров низкоскоростных высокопоглощающих локальных неоднородностей по интерференционным экстремумам волнового поля. На результатах физического моделирования, натурного эксперимента и сейсмологических данных показана эффективность предложенного итерационного алгоритма сейсмоэмиссионной томографии, который может быть применен для определения координат сейсмических источников в автоматическом режиме, без снятия времен вступлений целевых волн.

Разумеется, в рамках одной работы невозможно охватить все многообразие неидеальных сейсмических объектов и методов их изучения. Тем не менее, представленные результаты показывают, что исследования в этом направлении могут существенно расширить возможности сейсмических методов. Очевидно, что представления об идеальной упругости, на которых многие десятилетия базировалось большинство таких методов, далеко не всегда позволяют адекватно описывать эффекты, наблюдаемые при распространении сейсмических волн в реальных средах. Одно из основных направлений дальнейшего развития сейсмики связано с накоплением знаний о природе волновых явлений в неидеально-упругих средах, которые могли бы быть использованы для разработки новых моделей таких сред и методов их исследования. Несомненно, что определяющая роль в получении таких знаний должна отводиться экспериментальным исследованиям, результаты которых могут служить базой для соответствующих теоретических построений, а также для совершенствования существующих и создания новых сейсмических методов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аверко Е.М., Балеста С.Т., Григорян Г.Б., Гриценко С.А., **Колесников Ю.И.**, Максимов Л.А. Об одном способе интерпретации волновых полей, обусловленных существованием магматических очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. – 1981. – № 2. – С. 78-88.
2. **Колесников Ю.И.**, Григорян Г.Б. Об интерференционном способе интерпретации волновых полей, зарегистрированных при сейсмическом просвечивании низкоскоростных высокопоглощающих включений // Геология и геофизика. – 1983. – № 5. – С. 89-97.
3. Аверко Е.М., **Колесников Ю.И.** Об одной модели поглощения сейсмических волн // Геоакустические исследования по многоволновой сейсморазведке: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 20-42.

4. **Колесников Ю.И.** Поглощение сейсмических волн в горных породах // Геоакустические исследования по многоволновой сейсморазведке: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 42-72.
5. **Колесников Ю.И.** Отражение и преломление сейсмических волн на границе раздела поглощающих сред // Исследования по многоволновой сейсморазведке в геоакустическом диапазоне частот: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 30-47.
6. Аверко Е.М., **Колесников Ю.И.**, Шерубнев А.И. Некоторые различия свойств сплошных сред в статике и сейсмике (по модельным исследованиям) // Исследования по многоволновой сейсморазведке в геоакустическом диапазоне частот: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 59-68.
7. **Колесников Ю.И.** Сравнительный анализ поглощения объемных сейсмических волн и нормальных волн в тонких стержнях и пластинах // Геоакустические исследования. Методика и аппаратура: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1988. – С. 67-83.
8. **Колесников Ю.И.**, Котельников Е.И. Модельные исследования сейсмических волновых полей в угленосных отложениях Кузбасса при наличии разрывных нарушений // Геоакустические исследования. Методика и аппаратура: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1988. – С. 84-95.
9. **Колесников Ю.И.**, Игнатов А.Ю., Аверко Е.М. К вопросу об измерении поглощения *P*-волн по данным акустического каротажа // Исследования по многоволновому акустическому каротажу и сейсмомоделированию: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1990. – С. 52-66.
10. Котельников Е.И., **Колесников Ю.И.** Выявление крутопадающих разрывных нарушений на угольных месторождениях (по данным физического моделирования) // Исследования по многоволновому акустическому каротажу и сейсмомоделированию: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1990. – С. 66-80.
11. **Колесников Ю.И.**, Игнатов А.Ю., Кокшаров В.З. О точности оценок поглощения *P*-волн по данным акустического каротажа. Результаты физического моделирования // Геология и геофизика. – 1992. – № 9. – С. 134-141.
12. **Колесников Ю.И.**, Игнатов А.Ю. Об одном способе подавления регулярных волн-помех на сейсмических записях // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 2. – С. 137-140.
13. А.с. 1833825 СССР, МКИ⁵ G 01 V 1/90. Способ акустического каротажа / **Колесников Ю.И.**; заявитель и патентообладатель Институт геологии и геофизики им. 60-летия Союза ССР – № 4923356/25; заявл. 16.01.91; опубл. 15.08.93, Бюл. № 30. – 2 с.
14. **Колесников Ю.И.**, Игнатов А.Ю. Физическое моделирование акустических волновых полей в скважине с радиальной неоднородностью // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35, № 3. – С. 137-143.
15. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Полозов С.В. Лабораторные исследования акустических свойств грунтов в условиях сдвигового разрушающего деформирования // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли:

- Труды международной конференции, Новосибирск, 4-7 октября 1999 г. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999. – С. 195-199.
16. Гольдин С.В., **Колесников Ю.И.**, Полозов С.В. Распространение акустических волн в грунтах в условиях изменяющегося сдвигового напряжения (вплоть до разрушения образцов) // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 6. – С. 105-113.
 17. Гольдин С.В., **Колесников Ю.И.**, Полозов С.В. Акустические свойства связных и несвязных грунтов – сходство и различия // Сборник трудов X сессии Российского акустического общества. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 186-189.
 18. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Полозов С.В. Анализ структуры микросейсмического поля с целью оценки устойчивости склонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 8. – С. 104-105.
 19. **Колесников Ю.И.**, Полозов С.В. Передвижной автономный четырехканальный цифровой регистратор акустических сигналов // Методы, технические средства, методика обработки и интерпретации геолого-геофизических исследований при создании государственной сети опорных геофизических профилей: Доклады Всеросс. семинара (Новосибирск, 10-13 ноября 1999 г.). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2001. – С. 105-109.
 20. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Дучков А.Д., Полозов С.В. Особенности поляризации микросейсмического поля на оползнеопасных участках склонов на примере Суусамырского оползня // Проблемы геомеханики и геотехнического освоения горных территорий: Труды международной конференции, посвященной 40-летию ИФиМП и международному Году гор (Бишкек, 4-6 октября 2000 г.). – Бишкек: Илим, 2001. – С. 131-139.
 21. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Полозов С.В. Акустические свойства грунтов в условиях меняющегося сдвигового напряжения // Проблемы геомеханики и геотехнического освоения горных территорий: Труды международной конференции, посвященной 40-летию ИФиМП и международному Году гор (Бишкек, 4-6 октября 2000 г.). – Бишкек: Илим, 2001. – С. 140-146.
 22. **Колесников Ю.И.**, Бабушкин С.М., Дучков А.Д., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Тригубович Г.М. Изучение геофизическими методами структурных и геодинамических особенностей оползневого склона в долине р. Суусамыр (Северный Тянь-Шань, Республика Киргизия) // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 10. – С. 1574-1584.
 23. Полозов С.В., **Колесников Ю.И.** Цифровая телеметрическая система для сейсмических наблюдений в скважинах // Проблемы региональной геофизики: Материалы конференции (Новосибирск, 5-7 декабря 2001 г.). – Новосибирск: ООО "Типография Сибири", 2001. – С. 92-96.
 24. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Полозов С.В. Сейсмические свойства влажных сыпучих грунтов, находящихся в состоянии предразрушения // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы 1-й Междунар. школы-семинара (9-15 сент., 2001, г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2002. – С. 157-161.

25. Назаров Л.А., **Колесников Ю.И.** Оценка устойчивости горных склонов по данным математического моделирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2002. – № 4. – С. 46-52.
26. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Полозов С.В. Изменение акустических свойств влажных грунтов при их сдвиговом деформировании (результаты лабораторных экспериментов) // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. Новосибирск, 2002. – Вып. 121. – С. 97-102.
27. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Немирович-Данченко М.М. Поляризационный подход к оценке стабильности склонов по микросейсмическим наблюдениям // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 10-летию Российского фонда фундаментальных исследований (Иркутск, 1-4 октября 2002 г.). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2002. – С. 507-509.
28. **Колесников Ю.И.**, Гольдин С.В., Полозов С.В. Изменение акустических свойств грунтов в процессе сдвигового деформирования // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 10-летию Российского фонда фундаментальных исследований (Иркутск, 1-4 октября 2002 г.). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2002. – С. 509-510.
29. Немирович-Данченко М.М., **Колесников Ю.И.** О различных сценариях распространения трещин в геоматериалах // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 1. – С.33-39.
30. **Kolesnikov Yu.I.**, Nemirovich-Danchenko M.M., Goldin S.V., Seleznev V.S. Slope stability monitoring from microseismic field using polarization methodology // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2003. – V. 3, N 6. – P. 515-521.
31. **Колесников Ю.И.** Экспериментальные данные об изменении акустических свойств влажного песка в процессе стабилизации // Сборник трудов XIII сессии Российского акустического общества. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 118-119.
32. **Колесников Ю.И.**, Хогоев Е.А., Донцов М.В. О выборе систем наблюдений для сейсмоземиссионной томографии // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы междунар. геофиз. конф., г. Новосибирск, 15-19 сент. 2003 г. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – С. 117-121.
33. Полозов С.В., **Колесников Ю.И.** Автономная многоканальная аппаратура для инженерно-сейсмологических наблюдений // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы междунар. геофиз. конф., г. Новосибирск, 15-19 сент. 2003 г. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – С. 429-431.
34. **Колесников Ю.И.**, Медных Д.А. О некоторых особенностях распространения акустических волн во влажном песке // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 69-74.
35. Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., **Колесников Ю.И.**, Подкорытова

- В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // Доклады Академии Наук. – 2004. – Т. 395, № 4. – С. 534-536.
36. **Колесников Ю.И.** Отражение ультразвука от границы вода – водонасыщенный песок при наклонном падении // Сборник трудов XV сессии Российского акустического общества. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 302-305.
 37. **Колесников Ю.И.,** Хогоев Е.А., Полозов С.В., Донцов М.В. Применение сейсмомиссионной томографии для локализации сейсмических источников // Сейсмические исследования земной коры: Сборник докладов Международной научной конференции, г. Новосибирск, 23-25 ноября 2004 г. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – С. 129-134.
 38. **Колесников Ю.И.,** Полозов С.В. Переносная аппаратура для микросейсмических и инженерно-сейсмологических наблюдений и возможности ее применения в геомеханике // Развитие инженерных методов в геомеханике: оценка, прогноз, контроль (Авершинские чтения): Материалы международной научно-практической конференции (Бишкек, 21-22 октября 2004 г.). – Бишкек: ИФимГП НАН КР, 2005. – С. 126-128.
 39. Немирович-Данченко М.М., **Колесников Ю.И.,** Селезнев В.С. Некоторые особенности сейсмических волновых полей, излучаемых при сдвиговом разрушении горных пород // Развитие инженерных методов в геомеханике: оценка, прогноз, контроль (Авершинские чтения): Материалы международной научно-практической конференции (Бишкек, 21-22 октября 2004 г.). – Бишкек: ИФимГП НАН КР, 2005. – С. 141-142.
 40. **Колесников Ю.И.** Отражение ультразвуковых импульсов от границы воды с неидеально упругими средами: экспериментальные данные для случая наклонного падения // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 91-97.
 41. **Колесников Ю.И.,** Шубин П.Е. Экспериментальное исследование отражения ультразвука от границы вода – водонасыщенный песок при наклонном падении // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. – Новосибирск, 2005. – Вып. 123. – С. 93-96.
 42. **Колесников Ю.И.,** Немирович-Данченко М.М., Никольская О.В. Возможности микросейсмических наблюдений при оценке состояния горных склонов // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го Международного симпозиума, 12-16 сентября 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – С. 161-164.
 43. **Колесников Ю.И.** Возможности микросейсмических наблюдений при оценке устойчивости склонов // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке: Материалы Третьего международного симпозиума, г. Бишкек, 30 октября – 6 ноября 2005 г. – Бишкек: НС РАН, 2005. – С. 97-98.
 44. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., **Колесников Ю.И.,** Рудаков А.Д. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 33-43.

45. **Колесников Ю.И.**, Медных Д.А. О влиянии сил капиллярного сцепления на акустические свойства ненагруженного влажного песка // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 81-89.
46. **Колесников Ю.И.**, Медных Д.А. Влияние сил капиллярного сцепления на акустические свойства ненагруженного влажного песка: экспериментальные данные // Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 244-247.
47. **Колесников Ю.И.**, Медных Д.А. Изменение акустических свойств ненагруженного влажного песка в процессе высыхания // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. – Новосибирск, 2007. – Вып. 124. – С. 53-57.
48. Опарин В.Н., Сашурин А.Д., Кулаков Г.И., Леонтьев А.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Тапсиев А.П., Хачай О.А., Хачай О.Ю., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., **Колесников Ю.И.**, Немирович-Данченко М.М., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Яковицкая Г.Е., Акинин А.А., Кю Н.Г., Панжин А.А., Дядьков П.Г., Кучай О.А., Кисельман С.И., Борисов В.Д. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / Отв. ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.
49. **Колесников Ю.И.** Оценки возможного влияния собственной дисперсии скоростей на результаты определения упругих модулей материалов // Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 261-264.
50. **Колесников Ю.И.**, Борода С.С. Об определении упругих констант высокопластичных материалов // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 121-126.

Технический редактор О.М.Вараксина

Подписано в печать 17.07.2009

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс.

Печ. л. 1,9. Тираж 130. Зак. № 26

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3