

На правах рукописи

КОНЬКОВ Андрей Игоревич

**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА
КОГЕРЕНТНОЙ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

01.04.06 – акустика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2016

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

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Касьянов Дмитрий Альбертович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт» (НИРФИ);

Дучков Антон Альбертович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН, г. Москва).

Защита диссертации состоится «29» июня 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «__» _____2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А.И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Примеры использования сейсмоакустических волн в исследованиях природных сред и для дистанционной диагностики их состояния хорошо известны [1, 2]. По времени распространения волн и характеру их колебаний можно определять глубину залегания неоднородностей, получать информацию о форме границ объекта, а также об упругих свойствах пород, через которые прошла волна. Самостоятельный интерес представляет исследование приповерхностных слоев (грунта) с глубинами залегания порядка 10 метров. Среди наиболее важных практических приложений малоглубинной диагностики можно отметить оценку устойчивости фундаментов инженерно-технических сооружений и состояния коммуникаций, определение потенциальной опасности развития оползневых процессов и т.п.

Отличительной особенностью малоглубинной сейсмоакустики является наличие сильного затухания упругих волн в грунте, обусловленное, с одной стороны, его относительной рыхлостью по сравнению с коренными породами [3], лежащими на значительных глубинах, и, с другой – сильной неоднородностью («мутностью») среды распространения сейсмоакустических волн [4]. Это приводит к невозможности использования высоких частот для повышения разрешающей способности и необходимости поиска альтернативных методов исследования. Возможным решением является использование стабильного линейного источника сейсмоакустического излучения. В этом случае малая амплитуда полезного сигнала рассеяния на протяженных (границы геологических образований с различной структурой внутренних связей) или локальных (включения) неоднородностях из-за необходимости использования относительно низких частот компенсируется высоким отношением сигнал/шум [4]. Это позволяет осуществлять когерентное накопление записей сигналов.

Вибрационный источник когерентных сейсмоакустических волн был разработан в ИПФ РАН [5]. Долговременная стабильность его излучения была продемонстрирована в [6]. Это позволяет использовать специфические для когерентных сигналов методы их генерации, накопления и обработки [7], обеспечивая тем самым высокое отношение сигнал/шум и возможность исследования природных сред в условиях их естественного существования, а также решения отмеченных выше важных практических задач.

Исследование акустических свойств природных сред на *малых* глубинах (~10 м) проводится в основном при использовании поверхностных волн в качестве зондирующих. Это связано, прежде всего, с их более слабой геометрической расходимостью по сравнению с объемными. Кроме того, высокая эффективность возбуждения поверхностной волны Рэлея вибрационным источником вертикальной силы (в приповерхностном слое более половины излучаемой энергии переносится именно этой волной [8–10]) позволяет уверен-

но выделить ее вклад в общей записи сейсмоакустического отклика исследуемой среды.

В основе всех известных к настоящему времени методов, основанных на анализе поверхностной волны Рэлея, лежит связь дисперсии фазовой скорости с неоднородностью исследуемой среды. При этом, как правило, задается *априорное* или типичное значение коэффициента Пуассона, что позволяет связать зависимость фазовой скорости волны Рэлея с модулем сдвига. Однако, отсутствие информации об истинной величине коэффициента Пуассона и его зависимости от глубины не позволяет определять структуру внутренних связей и, следовательно, выделять потенциально опасные с точки зрения развития катастрофических процессов разрушения слои. Поэтому в процессе разработки нового метода малоглубинной диагностики основное внимание было уделено поиску возможности восстановления *двух* упругих параметров (скоростей объемных волн) в слоистой среде.

Цель работы

Диссертационная работа направлена на разработку и экспериментальную демонстрацию практических возможностей нового метода когерентной сейсмоакустической диагностики земных пород на малых глубинах. При этом ставились следующие задачи:

1. Исследование возможности определения скоростей объемных (продольной и сдвиговой) волн в слоистой среде путем рассмотрения, дополнительно к дисперсионной характеристике, частотной зависимости отношения амплитуд проекций вектора смещений в волне Рэлея и на этой основе развитие нового метода когерентной сейсмоакустической диагностики.

2. Экспериментальная демонстрация возможностей предложенного метода в приложении к практически важным задачам сейсмоакустической диагностики: реконструкции вертикального профиля упругих параметров земных пород (скоростей продольных и сдвиговых волн, коэффициента Пуассона), оценки устойчивости склонов, локализации малоконтрастных неоднородностей.

Научная обоснованность и достоверность результатов

Результаты теоретических исследований основаны на использовании стандартных методов решения задач о распространении волн в слоистых средах. Анализ полученных зависимостей указывает на согласие с известными ранее результатами и физическую обоснованность обнаруженных новых решений. В экспериментальных исследованиях использовался калиброванный источник сейсмоакустического излучения и стандартные многоканальные цифровые сейсмические станции. Измерения проводились в основном на сейсмоакустическом полигоне ИПФ РАН «Безводное», для которого имеется информация о структуре приповерхностных слоев. При обработке полученных экспериментальных данных использованы стандартные математические

процедуры (например, построение пространственно-временных спектров) и оригинальные методы обработки, основанные на известных математических процедурах. Полученные результаты реконструкции параметров сравнивались с полученными ранее на указанном полигоне, а также проводилось сопоставление результатов с известными и многократно апробированными модельными изображениями.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Разработан новый метод спектрального анализа поверхностных волн, основанный на совместном анализе дисперсионной характеристики, отвечающей фундаментальной моде поверхностной волны Рэлея, и частотной зависимости отношения амплитуд проекций вектора смещений.

2. С помощью предложенного метода экспериментально апробированы следующие задачи сейсмоакустической диагностики: мониторинг насыщения водой приповерхностных слоев грунта, локализация пространственно-распределенных неоднородностей малого акустического контраста на фоне окружающих пород, диагностика оползневой опасности склона.

Практическая значимость

Представленные в диссертации результаты представляют научный интерес для исследований изменения состояния природных сред под действием различных факторов, фильтрации жидкости в пористых средах, для оценки устойчивости при развитии катастрофических процессов и т.п. Они могут быть использованы при проведении изысканий под строительство инженерно-технических сооружений и коммуникаций, дистанционной диагностике устойчивости фундаментов и технического состояния трубопроводной сети, а также при определении потенциальной опасности развития оползневых процессов. Продемонстрированная возможность локализации неоднородностей малого контраста позволяет решать задачи поиска потенциально опасных источников зарождения карстовых провалов, исследовать динамику их развития. Локализация неоднородностей малого контраста при помощи развитых в диссертации методов когерентной малоглубинной сейсмоакустической диагностики открывает новые возможности исследований в области археологии.

Разработанный в диссертации метод исследований, являясь дистанционным волновым методом, может быть использован в задачах технической диагностики качества деталей и механизмов при переходе на другой частотный диапазон с использованием силового источника и векторных приемников соответствующих типов.

Полученные результаты были использованы при выполнении исследовательских проектов по грантам РФФИ (№№ 11-05-00774, 11-02-01419, 11-05-97031, 13-05-97053, 14-05-31249, 14-02-00695, 15-05-08196, 15-45-02450), по программам фундаментальных исследований ОФН РАН «Когерентные аку-

стические поля и сигналы» и «Фундаментальные основы акустической диагностики природных и искусственных сред».

Положения, выносимые на защиту

1. Совместный анализ дисперсии фазовой скорости фундаментальной моды поверхностной волны Рэлея и частотной зависимости отношения амплитуд проекций вектора смещений в этой волне позволяет реконструировать распределение коэффициента Пуассона по глубине в рамках модели горизонтально-однородной плоскослоистой среды.

2. Диагностика наличия водоносного слоя, его глубины залегания и мощности возможна при использовании поверхностных волн, не имеющих критических частот.

3. Разработанный метод позволяет решать задачи дистанционной сейсмоакустической диагностики и мониторинга состояния верхнего слоя земных пород, оценки объемного содержания трещин на склоне, локализации неоднородностей малого акустического контраста.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы представлены в 24 публикациях (из них 5 статей в реферируемых изданиях и 19 докладов и тезисов докладов). Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

- XV научная конференция по радиофизике, посвященная 110-й годовщине со дня рождения А.А. Андропова (Нижний Новгород, 2011)
- VII международная научно-техническая конкурс-конференция молодых специалистов «ГЕОФИЗИКА – 2011» (Санкт-Петербург, 2011)
- XVI научная конференция по радиофизике, посвященная 100-летию со дня рождения А.Н. Бархатова (Нижний Новгород, 2012)
- 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Париж, Франция, 2012)
- Сессия Научного совета по акустике РАН, совмещенная с XXV сессией Российского акустического общества (Москва, 2012)
- XVIII Нижегородская сессия молодых ученых (Нижегородская обл., 2013)
- Форум молодых ученых (Нижний Новгород, 2013)
- TECNIA CUSTICA 2013 (Валладолид, Испания, 2013) (приглашенный доклад)
- 5th International Geosciences Student Conference (Nizhny Novgorod, 2014)
- 1-я Всероссийская акустическая конференция (Москва, 2014)
- Научно-техническая конференция «Сейсмические технологии–2015» (Москва, 2015)

- XX Нижегородская сессия молодых ученых (Нижегородская обл., 2015)
- XIX научная конференция по радиофизике, посвященная 70-летию радиофизического факультета (Нижний Новгород, 2015)
- 6th International Geosciences Student Conference (Прага, Чехия, 2015)
- SEG International Exhibition & 85th Annual Meeting (Новый Орлеан, США, 2015)
- 170th Acoustical Society of America Meeting (Джексонвилл, США, 2015)
- VI International Conference of Young Scientists and Students “Multidisciplinary approach to solving problems of geology and geophysics” (Баку, 2015), а также на семинаре «Акустика неоднородных сред» им. проф. С.А. Рыбака (Москва, Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева, 2015 г.) и семинарах в ИПФ РАН.

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в разработке теоретической основы предложенного метода и его экспериментальной проверке в натуральных условиях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и приложения. Общий объем работы – 107 страниц, включая 42 рисунка и список литературы из 101 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** диссертации обосновано применение метода спектрального анализа поверхностных волн для задач малоглубинной сейсмоакустики. Его основная идея заключается в построении дисперсионной кривой поверхностной волны и в дальнейшем определении параметров среды путем инверсии, в частности, в восстановлении профиля скорости сдвиговой волны. Глубина проникновения поверхностной волны пропорциональна ее длине, а скорость, соответствующая каждой частоте, определяется параметрами среды распространения, в частности, скоростью сдвиговой волны. Иными словами, низкочастотные компоненты определяются параметрами глубоких слоев, а высокочастотные «захватывают» малые глубины (рис. 1). Таким образом, неоднородности среды приводят к зависимости модуля сдвига от глубины.

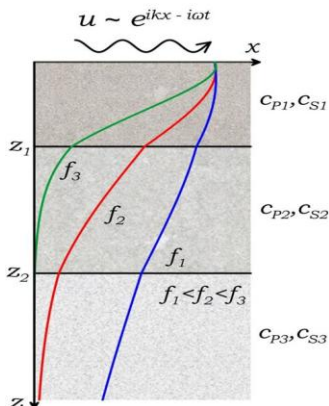


Рис. 1. Качественная зависимость глубины проникновения фундаментальной моды волны Рэлея от частоты

В §1.1 приведено описание метода спектрального анализа поверхностных волн SASW (от англ. «Spectral Analysis of Surface Waves»), оценены его преимущества и недостатки, основные стадии реализации (сбор данных, обработка данных, прямое моделирование, инверсия). Здесь же рассматривается дополнительный способ реконструкции параметров такой среды, основанный на понятии эффективной глубины проникновения возмущений поверхностной волны Рэлея в виде вертикальных смещений и не требующий выполнения итерационной процедуры и позволяющий, таким образом, получить их грубую оценку (например, в качестве начального приближения).

В §1.2 приведена численная схема построения решения задачи в рамках модели горизонтально однородной плоско-слоистой среды (матрица пропагатора).

В §1.3 рассмотрено аналитическое решение эталонной задачи о распространении нормальных волн в среде, которая состоит из упругого слоя, лежащего на слое жидкости, покрывающем упругое полупространство [1*]. Получено выражение для определителя соответствующей системы уравнений относительно амплитуд потенциалов смещения. Рассмотрен ряд предельных случаев, позволяющих убедиться в его корректности (полупространство со скользящим контактом [11], слой жидкости между двумя упругими слоями одинаковой толщины [12]). Проведен анализ структуры мод (рис. 2), отвечающих «водной» волне, связанной с изгибными колебаниями верхнего слоя (мода №1), и волне Рэлея (мода №2). Показано, что все нормальные моды в рассматриваемой модельной среде возбуждаются эффективно вертикальным силовым источником, что позволяет использовать анализ дисперсионных зависимостей и структуры мод для определения ее параметров.

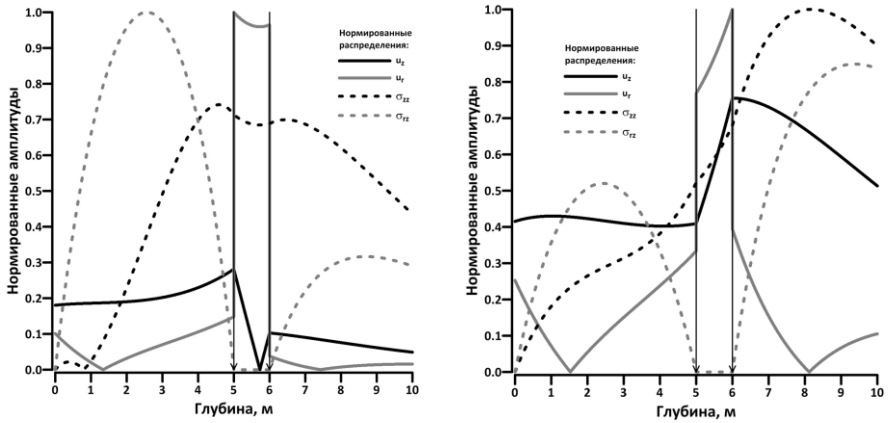


Рис. 2. Структура мод №1 (слева) и №2 (справа) для одинаковых значений волновой толщины верхнего слоя $kh = 2$. Вертикальные линии со стрелками показывают положение жидкого слоя по глубине

Далее продемонстрировано, что такая характеристика, как отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной проекций смещения u_x/u_z , является важным диагностическим признаком и ее введение в спектральный анализ поверхностных волн (т.е. переход от «стандартного» метода SASW к разработанному в рамках диссертационной работы методу PASW (от англ. «Projections Analysis of Surface Waves») – название дано по аналогии с SASW) действительно имеет смысл и позволяет расширить возможности реконструкции параметров слоистых сред [2*]. На рис. 3 и 4 приведен расчет для среды, составленной из двух упругих слоев при отсутствии проскальзывания между ними (условие «склейки»). Коэффициент Пуассона верхнего слоя $\nu = 1/3$, нижнего – $\nu = 1/4$, скорости сдвиговой волны в слоях одинаковы. Соответствующие зависимости показаны на графиках темно-серыми штриховыми линиями. Поскольку отношение скорости волны Рэлея к скорости сдвиговой волны есть монотонная возрастающая функция коэффициента Пуассона, наблюдается ее небольшое увеличение с ростом частоты. Как видно из рис. 3, диапазон изменений скорости составляет около 1%. Если коэффициент Пуассона неизвестен или задается априори, как это делается в стандартных приложениях SASW, то эти изменения можно ошибочно связать с изменением скорости сдвиговой волны. На рис. 4 штрих-пунктирной линией показана зависимость отношения u_x/u_z от частоты в случае равных величин коэффициента Пуассона в слоях. При этом относительные изменения скорости волны Рэлея составляли также около 1%, но были связаны с наличием отношений $C_v/C_T = 1,01$ и $C_v/C_L = 1,01$ для граничащих слоя и полупространства (C_v , C_L – скорости сдвиговой и продольной волны в верхнем слое, C_T , C_L – скорости сдвиговой и продольной волны в полупространстве). Нетрудно видеть, что

штрих-пунктирная линия отвечает практически постоянному значению u_r/u_z во всем диапазоне изменения волновой толщины верхнего слоя. При этом соответствующая зависимость при наличии указанного выше контраста коэффициента Пуассона характеризуется изменением величины u_r/u_z в пределах приблизительно 3%, что позволяет диагностировать изменение этого параметра. Это позволяет отказаться от использования априорной информации о величине коэффициента Пуассона и определять его значение непосредственно из экспериментальных данных, получая таким образом информацию о вертикальном распределении скоростей продольной и сдвиговой волн в рамках плоско-слоистой модели.

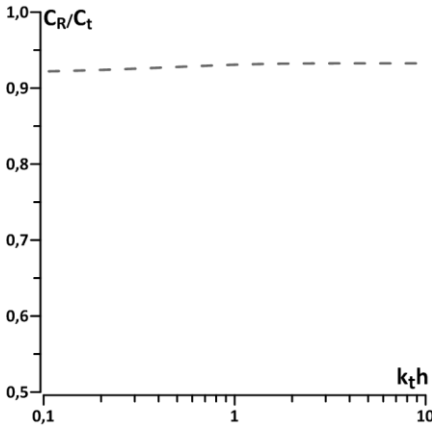


Рис. 3. Нормированная на скорость волны сдвига C_t фазовая скорость волны Рэлея C_R в зависимости от волновой толщины приповерхностного слоя $k_t h$

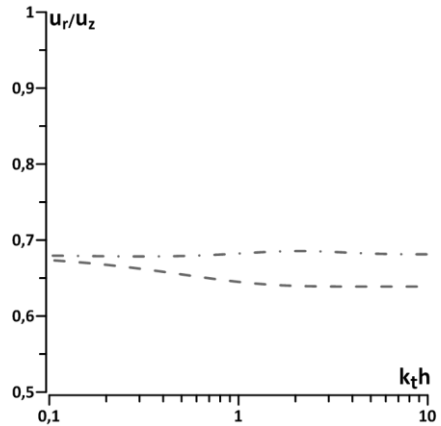


Рис. 4. Отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной проекций смещения u_r/u_z в зависимости от волновой толщины приповерхностного слоя $k_t h$. Дополнительные пояснения приведены в тексте

В §1.4 приводится заключение к первой главе.

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

Во **второй главе** рассмотрены примеры применения разработанного метода PASW для реализации схемы диагностики устойчивости и мониторинга состояния природных сред в натурных условиях при рассмотрении естественных (сезонных, §2.1) и искусственных (§2.2) вариаций уровня воды в грунте.

Для оценки скорости сдвиговой волны и коэффициента Пуассона осуществлялся поиск параметров среды, удовлетворяющих минимальному значению целевой функции. Целевая функция отвечала среднеквадратичному отклонению между измеренными и вычисленными величинами. Измеряемыми величинами являлись скорость распространения волны Рэлея C_R и отно-

шение амплитуд проекций u_x/u_z . Неизвестными параметрами рассматриваемой модели горизонтально однородной плоско-слоистой среды являлись число слоев, их мощность (толщина), а также скорости продольной (C_p) и сдвиговой (C_s) волн (в «стандартной» реализации метода SASW отношение C_p/C_s предполагается заданным).

Эксперименты, описанные в §2.1, проводились в разное время на одной и той же площадке: сейсмоакустическом полигоне ИПФ РАН «Безводное». Первая часть (с вибрационным источником) была выполнена в ходе экспедиции в июне 2009 г., вторая (с импульсным источником) – в ходе экспедиции в октябре 2011 г. В качестве вибрационного источника в эксперименте использовался широкополосный излучатель электродинамического типа, создающий осциллирующее вертикальное силовое воздействие (вертикальную силу). Излучаемый сигнал с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) генерировался программным образом и через согласующие цепи подавался на излучатель. Полоса частот излучения составляла 50–500 Гц. Для реализации импульсного источника проводилась серия ударов массивным телом. Отношение сигнал/шум для импульсного источника составляло ~60 дБ, эффективно передаваемая полоса частот – 15–45 Гц, что позволило провести профилирование на глубинах до 5 м.

Прием сигналов осуществлялся при помощи двух цифровых 24-х канальных сейсморазведочных станций «Лакколит X-M2», обеспечивавших запись вертикальных и горизонтальных проекций скорости колебаний свободной поверхности в полосе частот 5-500 Гц при низком уровне шумов. Сейсмостанции оснащены калиброванными широкополосными геофонами. В ходе экспериментов приемные геофоны располагались в линию, попарно вертикальный и горизонтальный геофоны (регистрировавшие соответствующие смещения поверхности), с фиксированным расстоянием между позициями пар (1 м в эксперименте с вибрационным источником и 2 м для низкочастотных записей с импульсного источника), создавая, таким образом, приемную антенну. Время записи одной реализации составляло 1024 мс для вибрационного источника и 3072 мс для импульсного источника. В случае вибрационного источника производилось усреднение по 100 реализациям, для импульсного источника было записано 10 реализаций и накопление не производилось (однако, результаты полученной затем реконструкции усреднялись).

Для выделения волны Рэлея из всех типов регистрируемых волн проводился анализ пространственно-временных спектров (F-K спектров, [13,14]) сигналов, принятых с геофонов. Анализ F-K спектров сигналов, полученных при использовании всех типов источников, показал, что высшие моды проявляются на частотах выше 130 Гц, где из-за низкого отношения сигнал/шум их анализ не имел смысла. При излучении вибрационного источника пространственная частота Найквиста составляла $0,5 \text{ м}^{-1}$, при излучении импульсного – $0,25 \text{ м}^{-1}$. Временная частота Найквиста в обоих экспериментах составляла 500 Гц. Для определения дисперсии скорости волны Рэлея и отношения ам-

плитуд проекций смещения на спектрах находились характеристические линии, отвечающие фундаментальной моде волны Рэля (критериями фундаментальной моды являлись ее яркость и нулевая граничная частота). Фазовая скорость определялась делением образующих характеристические линии значений: круговой частоты ω и волнового числа k , а отношение u_x/u_z – делением соответствующих спектральных амплитуд в точках, отвечающих вкладу волны Рэля.

Наименьшему среднеквадратичному отклонению между теоретическими и экспериментальными данными соответствует набор параметров, представленный на рис. 5. Профили скорости поперечной волны изображены серыми линиями, профили скорости продольной волны – черными. Коэффициент Пуассона для каждого слоя обозначен числом.

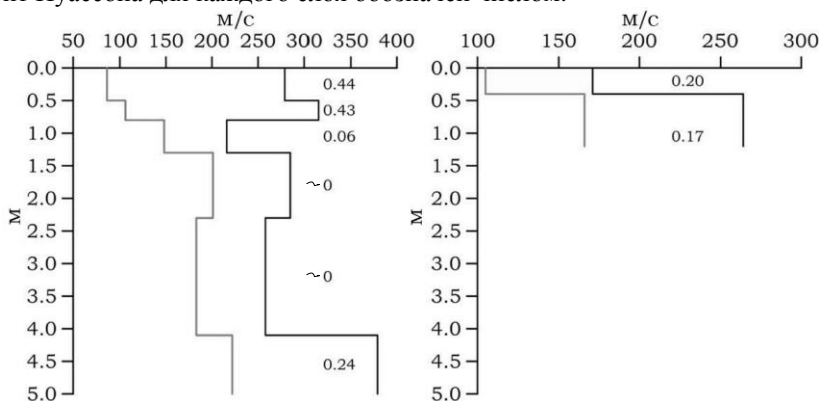


Рис. 5. Реконструированные профили скоростей объемных волн (слева – эксперимент с импульсным источником, справа – эксперимент с вибрационным источником)

Далее приведено сравнение этих профилей, выделены характерные границы слагающих грунт слоев, объяснены эффекты, связанные с изменением значений упругих параметров при изменении степени насыщения грунта в экспериментах 2009 и 2011 гг. В целях дополнительной верификации данных приведено их сравнение с результатами метода фазового межскважинного профилирования, проведенного на той же площадке в 2006 г [2*, 3*].

Эксперименты с мониторингом грунта при его контролируемом водонасыщении, описанные в §2.2, проводились в 2013 и 2014 гг. Сейсмические волны возбуждались тем же установленным на поверхности вибратором, что и в серии предыдущих экспериментов. Приемно-излучающий комплекс выглядел аналогично описанному в §2.1.

Результат реконструкции параметров среды представлен на рис. 6 (эксперимент 2013 г.: на контрольную область в течение двух дней, с перерывом на ночь выливался известный объем воды). Светло-серому цвету отвечает

начальное состояние грунта, темно-серому – в начале второго дня проведения измерений (соответствует уровню осадков в 21 мм), черному – в конце второго дня (по завершению эксперимента). Последнее отвечает практически полному насыщению, что соответствует уровню осадков в 50 мм или приблизительно их месячной норме в месте проведения измерений. Сплошные линии обозначают профили скорости сдвиговой волны в соответствующие стадии проведения эксперимента, пунктирные – профили скорости продольной волны.

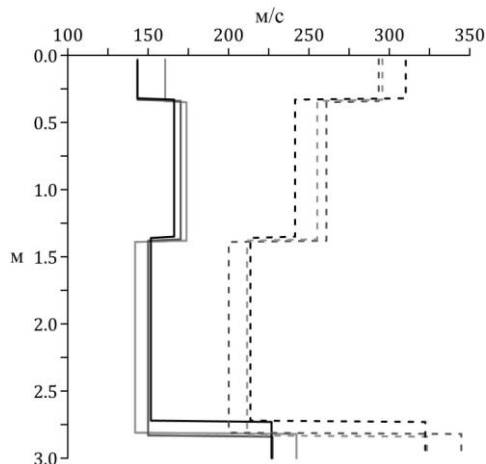


Рис. 6. Реконструированные профили скоростей объемных волн

Далее приведено физическое объяснение изменений таких параметров, как скорости продольной и сдвиговой волны в зависимости от объема жидкости в верхних слоях [4*].

В 2014 г. на полигоне «Безводное» была проведена серия экспериментов с целью продолжения исследования механоакустических свойств дисперсного грунта и его неустойчивости при насыщении жидкостью в натуральных условиях. За неделю до эксперимента была выкопана траншея шириной 20 см и глубиной 50 см, в которую был помещен шланг с отверстиями. Грунт затем был тщательно утрамбован. Один конец шланга был заглушен, а второй – подсоединен к системе центрального водоснабжения через счетчик воды. Счетчик имел погрешность 0,1 л, что при полном объеме вылитой жидкости 224 л пренебрежимо мало.

Приемная антенна, состоящая из геофонов горизонтальной и вертикальной ориентаций (аналогично вышеописанным экспериментам), была размещена на поверхности, вдоль линии шланга. На расстоянии 1 м от крайнего датчика устанавливался вибратор. Вибратор возбуждался ЛЧМ-сигналом в полосе от 3 до 430 Гц. Во время насыщения грунта водой проводилась непрерывная запись отклика среды. По завершению эксперимента грунт под вибра-

тором провалился, и вибратор потерял свое вертикальное положение. Запись была непрерывной, что позволило в дальнейшем выделить наиболее характерные этапы насыщения и связанные с ними изменения.

В результате решения обратной задачи был определен характер изменений модуля сдвига (G) и коэффициента Пуассона (ν) с течением времени (рис. 7) в объеме раскопанной траншеи.

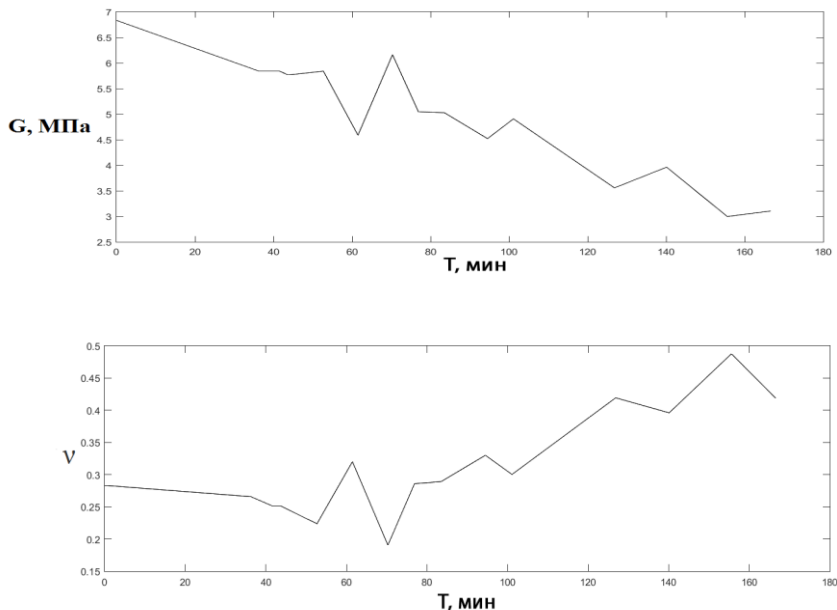


Рис. 7. Временные зависимости модуля сдвига (сверху) и коэффициента Пуассона (снизу) в приповерхностном слое при насыщении грунта водой

В §2.3 произведено сравнение возможностей применения импульсного и когерентного вибрационных источников для решения круга описанных во второй главе задач и сделаны основные выводы о возможностях разработанного метода PASW для диагностики устойчивости и мониторинга степени насыщения водой пористых сред в условиях их естественного залегания, что может быть полезно как для развития систем диагностики, так и в фундаментальных исследованиях.

Основные результаты второй главы изложены в статьях [2* – 4*].

В **третьей главе** диссертации продемонстрированы возможности разработанного метода PASW для решения задач локализации пространственно-распределенных неоднородностей. Эти задачи отвечают переходу от двумерной в трехмерную область.

В §3.1 предложена пробная схема диагностики оползнеопасности склона, основанная на сравнении частотных характеристик волны Рэля (фазовой скорости и отношения амплитуд проекций смещения), измеренных вдоль и поперек склона. Измерения были проведены на склоне с уклоном около 30° при размещении источника и двух приемных антенн, составленных из геофонов, регистрирующих вертикальную и горизонтальную проекции смещения, в направлениях, которые отвечают распространению волн вдоль и поперек склона. Результат обработки показан на рис. 8 (снизу). Далее приведено объяснение полученных зависимостей на основе факта анизотропии скоростей объемных волн, распространяющихся вдоль и поперек склона, связанной с наличием ориентированных в нем трещин (расслоений) [3*].

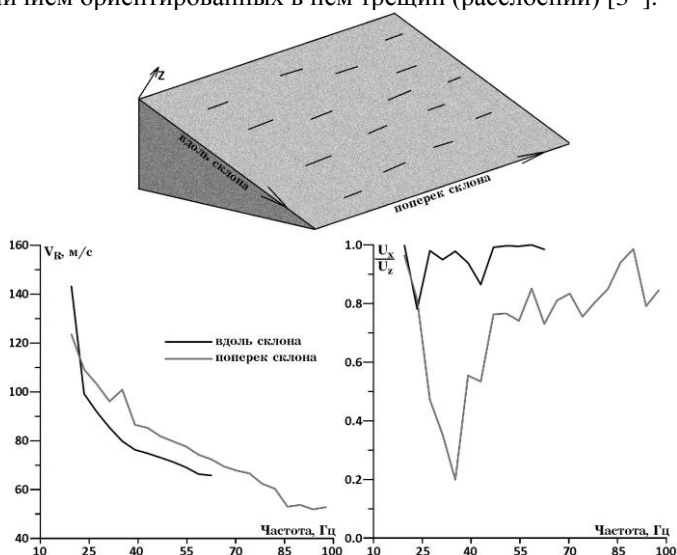


Рис. 8. Дисперсионные зависимости (слева) и частотные зависимости отношения амплитуд проекций смещения (справа) в измерениях характеристик волны Рэля вдоль и поперек склона. На рисунке сверху линиями схематично показана система расслоений

В §3.2 представлен результат разработанного метода спектрального анализа поверхностных волн PASW для решения задачи оконтуривания археологических площадок при условии малого акустического контраста неоднородностей на фоне окружающего грунта. Апробация была произведена на могильнике угро-финских племен IV – VII вв. н.э., расположенного в Богородском р-не Нижегородской обл. Грунт в месте проведения соответствующих измерений был по составу схожим с грунтом в месте проведения большинства описанных в диссертации экспериментов (суглинок). Обработка данных на основе развитого сейсмоакустического метода позволила локали-

зовать ряд малококонтрастных приповерхностных неоднородностей грунта (рис. 9), которые связаны с присутствием останков древних захоронений [3*, 4*].

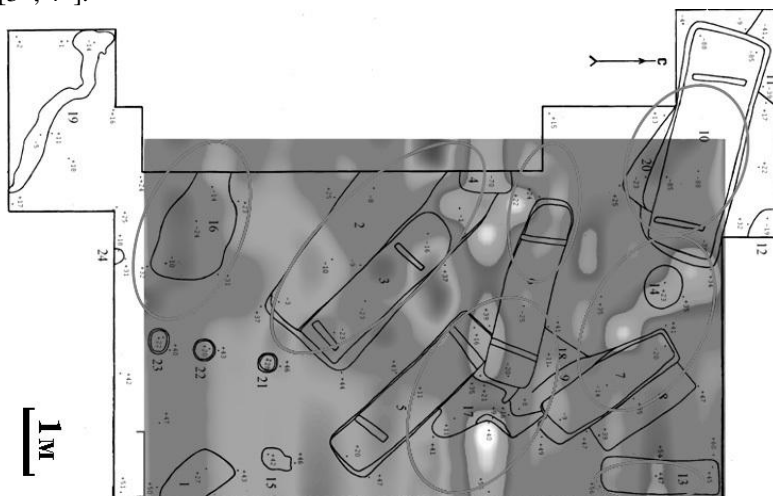


Рис. 9. Распределение отношения амплитуд проекций смещения грунта в волне Рэля (результат наложения данных сейсмоакустического метода PASW на карту раскопок, впоследствии предоставленную археологами)

В §3.3 приводится заключение к третьей главе.

Основные результаты третьей главы изложены в статьях [3* – 5*].

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **Приложении** приведено сравнение данных сейсмоакустического метода PASW с результатами других геофизических методов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан новый метод спектрального анализа поверхностных волн, основанный на совместном анализе дисперсионной характеристики, отвечающей фундаментальной моде волны Рэля, и частотной зависимости отношения амплитуд проекций смещения. Показано, что эта зависимость связана с вертикальным распределением коэффициента Пуассона и, таким образом, позволяет решать задачи реконструкции упругих параметров в рамках модели горизонтально однородной плоско-слоистой среды.

2. Проведено теоретическое исследование распространения поверхностных волн в модельной среде, содержащей водоносный слой. Показана возможность дистанционной диагностики наличия такого слоя, его мощности и глубины залегания.

3. На основе разработанного метода реализованы и экспериментально апробированы схемы когерентной сейсмоакустической дистанционной диагностики и мониторинга состояния земных пород на малых глубинах при насыщении водой. Реконструированы соответствующие профили упругих параметров грунта (скоростей продольных и сдвиговых волн, коэффициента Пуассона). Продемонстрирована чувствительность метода к наличию ориентированных относительно склона трещин, что позволяет оценить их объемную концентрацию.

4. На основе разработанного метода экспериментально продемонстрированы возможности реконструкции пространственного распределения объемных неоднородностей малого сейсмоакустического контраста (на примере археологических объектов – древних захоронений IV – VII вв. н.э.) Результаты реконструкции подтверждены сравнением с результатами применения неакустических методов диагностики земных пород и археологическими раскопками.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт, Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. – М.: Недра, 1986. – 262 с.
2. Аки, К., Ричардс, П. Количественная сейсмология: теория и методы. – М.: Мир, 1983. – 880 с.
3. Авербах, В. С., Артельный, В. В., Боголюбов, Б. Н., Долинин, Д. В., Заславский, Ю. М., Марышев, А. П., Постоенко, Ю. К., Таланов, В. И. Применение мобильного сейсмоакустического комплекса для изучения геологической структуры и поиска неоднородностей на глубинах до 100 м // *Акустический журнал*. – 2001. – Т 47. – № 6. – С. 732-735.
4. Николаев, А. В. Изучение Земли невзрывными сейсмическими источниками – В кн.: *Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками*. М.: Наука, 1981. – С. 5–29.
5. Авербах, В. С., Артельный, В. В., Боголюбов, Б. Н., Марышев, А. П., Постоенко, Ю. К., Таланов, В. И. Мобильный приемно-излучающий комплекс для малоглубинной сейсмодиагностики. – В кн.: *Методы акустической диагностики неоднородных сред*. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. – С. 207–220.
6. Авербах, В. С., Лебедев, А. В., Марышев, А. П., Таланов, В. И. Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // *Акустический журнал*. – 2008. – Т.54. – №4. – С. 607–620.
7. Лебедев, А. В., Малеханов А. И. Когерентная сейсмоакустика // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2003. – Т.46. – №7. – С. 579–597.
8. Бондарев, В. И. Основы сейсморазведки. – Екатеринбург: УГГГА, 2003. – 332 с.
9. Коган, С. Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука, 1975. – 153 с.
10. Гуцин, В. В., Докучаев, В. П., Заславский, Ю. М., Конюхова, В. Д. О распределении мощности между различными типами излучаемых волн в полубезграничной упругой среде. – В кн.: *Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками*. М.: Наука, 1981. – С. 113–118.
11. Заславский, Ю. М., Митякова, О. И. Дисперсия поверхностных волн в структуре: упругий слой и полупространство в скользящем контакте // *Акустический журнал*. – 1992. – Т. 38. – №2. – С. 296-303.
12. Korneev, V., Danilovskaya, L., Nakagawa, S., Moridis, G. Krauklis wave in a trilayer // *Geophysics*. – 2014. – V. 79. – №4. – P. L33-L39.
13. Хаттон, Л., Уэрдингтон, М., Мейкин, Дж. Обработка сейсмических данных, теория и практика. – М.: Мир, 1989. – 215 с.
14. Yilmaz, O. *Seismic data analysis*. – Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 2001. – 2027 p.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Разин, А. В. Анализ поверхностных волн в упругой среде с водоносным слоем // Изв. вузов. Радиофизика. – 2016 – Т. 59. – № 6.
- 2*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. Rayleigh Wave Dispersive Properties of a Vector Displacement as a Tool for P- and S-wave Velocities Near Surface Profiling. – In: Handbook of Geomathematics (2nd edition) / W. Freeden, M. Z. Nashed, T. Sonar (Eds.) – Heidelberg: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2015. – P. 2189–2206.
- 3*. Авербах, В. С., Грибов, Н. Н., Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Малеханов, А. И., Манаков, С. А., Таланов, В. И. Новый метод томографии неоднородностей на основе волны Рэлея: примеры практического использования // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 10 (в печати).
- 4*. Авербах, В. С., Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Малеханов, А. И., Манаков, С. А., Таланов, В. И. Методы когерентной инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН // Технологии сейсморазведки. – 2015. – Т. 2. – С. 119–123.
- 5*. Авербах, В. С., Бредихин, В. В., Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А., Таланов, В. И. Нелинейная акустическая спектроскопия гранита – сравнение данных натуральных и лабораторных экспериментов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62. – №3. – С. 363–368.
- 6*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Акустическое профилирование с использованием портативного вибратора и цифровой сейсмостанции: волна Рэлея // Труды XV научной конференции по радиофизике, посвященной 110-й годовщине со дня рождения А. А. Андропова (Нижний Новгород, 1-13 мая 2011 г.) /Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Нижний Новгород: ННГУ, 2011. – С. 219–221.
- 7*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. The use of a portable vibrator and digital seismic station for surface layers probing // Proceedings of the XVth Scientific Conference on Radiophysics dedicated to the 110th Anniversary of A. A. Andronov's Birth (Nizhni Novgorod, May 10-13, 2011). /Ed. by S.M. Grach, A.V. Yakimov. Nizhny Novgorod: UNN, 2011. – P. 292–293.
- 8*. Коньков, А. И., Манаков, С. А. Оценка параметров грунта на основе анализа характеристик волны Рэлея // Сборник тезисов докладов VII международной научно-технической конкурс-конференции молодых специалистов «ГЕОФИЗИКА – 2011». Санкт-Петербург, 2011. – С. 169-173.
- 9*. Коньков, А. И., Манаков, С. А. Оценка параметров грунта на основе анализа характеристик волны Рэлея // Геофизические методы исследования Земли и ее недр: Материалы VIII Международной научно-практической конкурс-конференции «Геофизика-2011». 3 - 7 октября 2011 г. /Под ред. С. В. Аплонова, В. П. Кальварской, В. Н. Трояна. СПб: Соло, 2012. – С. 99–102.

- 10*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Диагностика природных сред на основе анализа частотных зависимостей фазовой скорости и амплитуд проекций смещения в волне Рэлея // Труды XVI научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А. Н. Бархатова (Нижний Новгород, 11-18 мая 2012 г.) /Под ред. С. М. Грача, А. В. Якимова. Нижний Новгород: ННГУ, 2012. – С. 225–226.
- 11*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. The Near Surface Profiling based on the Rayleigh Wave Dispersive Properties for Vector Displacement // Proceedings of the Near Surface Geoscience–2012 — 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Paris, 2012. – 5 p.
- 12*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Построение профиля скорости волны сдвига и коэффициента Пуассона на основе анализа характеристик волны Рэлея // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». М.: ГЕОС, 2012. – С. 332–336.
- 13*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Поверхностная волна Рэлея как инструмент для мониторинга природных сред в натуральных условиях // Сборник тезисов 18-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественные, математические науки), Арзамасский р-н (Нижегородская обл.), 2013.– 2 с.
- 14*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Мониторинг насыщения водой дисперсных грунтов в натуральных условиях на основе анализа характеристик поверхностной волны Рэлея // Форум молодых ученых: Тезисы докладов. Том 1. Нижний Новгород: ННГУ, 2013. – С. 162-164.
- 15*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. Subsoil characterization with use of acoustical methods // Official publication of congress “TECNIACÚSTICA 2013”, 2013. – С. 1124-1130.
- 16*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. SASW/MASW method: prospects of the usage in archaeogeophysics // Proceedings of the 5th International Geosciences Student Conference (Nizhny Novgorod, Russia, July 28 – August 1, 2014), 2014. – P.158–160.
- 17*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Дистанционная диагностика состояния грунтов с использованием информации о поверхностной волне Рэлея // Сборник трудов 1-ой Всероссийской акустической конференции (6-10 октября 2014 г.), 2014. – С. 52-58.
- 18*. Авербах, В. С., Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Малеханов, А. И., Манаков, С. А., Таланов, В. И. Развитие методов когерентной инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН. // Сборник тезисов Научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2015» (13-15 апреля 2015 г.) –С. 130-133.
- 19*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А. Диагностика разжижения грунта при его насыщении водой по данным измерений характеристик поверхностной волны Рэлея // XX Нижегородская сессия молодых ученых. Ес-

- тественные, математические науки : материалы докладов / Отв. за вып. Зверева И. А. – Княгинино: НГИЭУ, 2015. – С. 28–29.
- 20*. Коньков, А. И., Лебедев, А. В., Манаков, С. А., Малеханов, А. И., Грибов, Н. Н., Игнатъев, В. И., Полицина, А. В., Заклучнов, И. С. Опыт применения различных геофизических методов в археологии // Труды XIX научной конференции по радиофизике, посвященной 70-летию радиофизического факультета. Нижний Новгород: ННГУ, 2015. – С. 248-249.
- 21*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. The diagnostics of soil liquefaction when saturated with water based on the measurements data of Rayleigh surface wave characteristics // 6th International Geosciences Student Conference (13-16 July 2015, Prague, Czech Republic) Abstract Book, 2015. – P. 131–133.
- 22*. Lebedev, A. V., Manakov, S. A., Malekhanov, A. I., Salin, M. B., Gribov, N. N., Shchennikov, A. V., Policina, A. V., Ignatev, V. I., Shalimova E. A., Zakluchnov I. S., Brüning, L., Handel, J., Prasche, M. Integration of geophysics and archaeology: Exploring a burial site of the 4th to 7th century near Nizhny Novgorod, Russia // SEG International Exhibition and Annual Meeting 2015 (New Orleans, USA), Extended abstract, 2015. – P. 2369-2373.
- 23*. Konkov, A. I., Lebedev, A. V., Manakov, S. A. The acoustic study of soil liquefaction effects in-situ // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2015. – Vol. 138. – №. 3. – Pt. 2 of 2. – P. 1938-1939.
- 24*. Lebedev, A. V., Manakov, S. A., Malekhanov, A. I., Salin, M. B., Gribov, N. N., Shchennikov, A. V., Policina, A. V., Ignatev, V. I., Shalimova E. A., Zakluchnov I. S., Brüning, L., Handel, J., Prasche, M. Application experience of different geophysical methods in archaeology // VI International Conference of Young Scientists and Students “Multidisciplinary approach to solving problems of geology and geophysics”. Baku: ELM, 2015. – P. 23-25.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Теоретическое обоснование нового метода сейсмоакустической диагностики на основе поверхностных волн

- 1.1 Метод спектрального анализа поверхностных волн SASW
- 1.2 Описание схемы численного решения задачи
- 1.3 Предлагаемая схема реконструкции параметров слоистых сред с учетом отношения амплитуд проекций вектора смещения
- 1.4 Заключение

Глава 2. Применение метода PASW для решения задач реконструкции вертикального разреза земных пород

- 2.1 Мониторинг естественных (сезонных) изменений уровня воды в грунте
- 2.2 Мониторинг изменений характеристик грунта, связанных с искусственным водонасыщением
- 2.3 Заключение

Глава 3. Применение метода PASW для решения задач диагностики объемных неоднородностей

- 3.1 Оценка трещиноватости земных пород
- 3.2 Обнаружение малоконтрастных неоднородностей, связанных с археологическими захоронениями
- 3.3 Заключение

Заключение

Список литературы

Приложение. Результаты стандартных геофизических методов (магниторазведка, электроразведка, георадиолокация) на археологической площадке

КОНЬКОВ Андрей Игоревич

**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА
КОГЕРЕНТНОЙ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

А в т о р е ф е р а т

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

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