

## ОТЗЫВ

официального оппонента Касьянова Дмитрия Альбертовича – доктора физико-математических наук, заведующего отделом НИРФИ, на диссертационную работу Конькова Андрея Игоревича «Разработка и экспериментальная апробация метода когерентной малоглубинной сейсмоакустической диагностики на основе поверхностных волн», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Проблемы, связанные с излучением и распространением упругих волн в природных средах, являются одними из центральных как для общей теории физики, так и для многочисленных прикладных исследований. Им посвящены тысячи фундаментальных и прикладных работ. Тем не менее, при решении многих научно-технических и производственных задач, возникает потребность в развитии новых специфических методов и подходов, позволяющих плодотворно решать задачи распространения волн в контексте тех или иных актуальных разделов современной науки и техники. Сюда относится, в частности, обсуждаемый в данной диссертационной работе, комплекс актуальных научных и прикладных вопросов, связанный с развитием методов диагностики приповерхностных слоёв Земли. Необходимо отметить, что сам объект исследования, грунты или породы с неглубоким залеганием, чрезвычайно сложен – это многокомпонентная неоднородная среда с весьма сильным затуханием и дисперсией, причём неоднородности имеют широкий спектр размеров.

Актуальность диссертационной работы несомненна, так как в ней рассматриваются вопросы, связанные с совершенствованием методов бесконтактной диагностики состояния приповерхностного слоя Земли, причём самого сложного для исследований, с залеганием не более 10 метров. Слой этот связан непосредственно с жизнедеятельностью человека, как с прошлой, так и с текущей. Развиваемый автором диссертации метод связан с исследованием характеристик волны Рэлея, которые весьма чувствительны к наличию неоднородностей в области её распространения. История развития методов малоглубинной диагностики с помощью поверхностных волн Рэлея насчитывает более полувека, методы эти совершенствовались вместе с

развитием методов прикладной математики и методов обработки сигналов, с увеличением мощности вычислительных средств и тд. Подход автора настоящей диссертации к развитию методов малоглубинной диагностики грунтов с помощью поверхностных волн связан с учётом дисперсионной зависимости отношения компонент вектора скорости волны Рэлея при реконструкции, например, профиля скорости волны сдвига.

Перейдём к анализу конкретного содержания диссертационной работы, в том порядке, в каком они изложены в диссертации.

Во введении диссертации изложено авторское видение состояния научно-технической проблемы, решению которой посвящена диссертационная работа, сформулированы цель и конкретные задачи исследования, обосновывается научная новизна и практическая значимость проведенных диссертантом исследований.

В первой главе диссертации обсуждается применение метода спектрального анализа поверхностных волн SASW для задач малоглубинной диагностики грунтов. Представлен исторический контекст его развития, этапы реализации, обсуждаются его достоинства и недостатки, приведена одна из численных схем построения решения для случая распространения волн в горизонтально однородной плоскослоистой среде.

Для адаптации метода непосредственно для диагностики водонасыщения грунтов автором полно и обстоятельно решается модельная задача о распространении поверхностных волн в среде, которая состоит из упругого слоя, лежащего на слое жидкости, покрывающем упругое полупространство. Проведённый анализ дисперсионных зависимостей для нормальных волн показал, что, используя эталонные решения можно построить метод определения как мощности, так и глубины залегания водоносного слоя. Кроме этого показано, что дополнительная диагностическая информация, связанная с измерением на дневной поверхности отношения амплитуд проекций вектора смещений для волны Рэлея, может оказаться существенной для решения задач реконструкции особенностей строения приповерхностного слоя Земли. Совместный анализ дисперсии фундаментальной моды Рэлея и частотной зависимости отношения амплитуд проекций смещения в волне Рэлея получил в

диссертации собственное название: Projections Analysis of Surface Waves (PASW).

Вторая глава посвящена серии экспериментов, результаты которых обрабатывались по алгоритмам метода PASW. В экспериментах реализованы схемы мониторинга и контроля устойчивости верхнего слоя грунта в натуральных условиях при естественных и искусственных вариаций уровня водонасыщения. В начале главы приводится общий для подобных экспериментов алгоритм восстановления вертикального профиля параметров исследуемого грунта в рамках модели горизонтально однородной плоскострой среды на основе анализа экспериментальных данных, касающихся частотных зависимостей фазовой скорости и отношения проекций смещений волны Рэлея. Далее демонстрируются возможности метода по реконструкции поперечной и продольной скорости в приповерхностной слое грунта, находящегося в естественном залегании при неизвестных характеристиках его водонасыщенности. Эксперименты проведены для различных способов возбуждения поверхностных волн в различные времена года на полигоне ИПФ РАН «Безводное». В результате обработки экспериментальных данных реконструированы профили сдвиговой и продольной волны, совместный анализ которых позволяет судить о строении приповерхностного слоя. Полученные в этих экспериментах данные во многом противоречивы, что является совершенно естественным из-за сложности объекта исследований и отсутствия многих априорных данных. Однако желание автора преодолеть противоречия, привлечь различные физические механизмы для объяснения полученных результатов выглядят вполне достойно. В этой же главе представлен эксперимент по исследованию прочностных свойств грунта при его искусственном водонасыщении, показано, что с помощью применяемого метода возможна реконструкция коэффициента Пуассона, по временной динамике которого можно судить о приближении такого катастрофического явления, как потеря устойчивости грунта при обводнении.

В третьей главе диссертации рассмотрено применение разрабатываемого автором метода для решения задач диагностики объёмных неоднородностей.

В первой части главы приводятся результаты эксперимента по оценки чувствительности метода к таким неоднородностям приповерхностного слоя, как трещины. Автором выбран удачный естественный модельный объект, это склон с достаточным углом наклона, чтобы образовались естественные, ориентированные определённым образом трещины. При этом продемонстрировано, что частотные зависимости скорости волны Рэлея и отношения компонент смещения, во-первых, имеют анизотропный характер и степень анизотропии может служить характеристикой трещиноватости, а во-вторых, весьма чувствительны к подобным нарушениям сплошности грунта.

Во второй части главы приводятся результаты эксперимента по использованию разрабатываемого автором метода для локации низко-контрастных неоднородностей в приповерхностном слое грунта. Эксперимент был частью крупномасштабных исследований по поиску археологических артефактов с помощью различных физических методов. Можно считать, при определённой доли фантазии, что результаты оконтуривания неоднородностей, полученные при помощи метода PASW, в целом положительные, так как не противоречат результатам собственно раскопок.

Результаты, полученные Коньковым А.И. и сформулированные в Заключение его диссертации, имеют научную и практическую значимость. Они, несомненно, будут востребованы при дальнейшей разработке методов малоглубинной сейсмики, предназначенных для различных применений. Весьма перспективным кажется использование результатов для совершенствования инженерно-изыскательских методик в строительстве, для построения методов прогноза оползневых явлений и тд.

При общей положительной оценке представленной диссертации необходимо отметить некоторые её недостатки.

1. Диссертация на соискание учёной степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, требующей определённого стиля изложения. Автор данной диссертации позволил себе местами более свободный и упрощённый, можно сказать презентационный стиль изложения. Особенно это касается второй и третьей глав. На взгляд рецензента – это серьёзный недостаток.

2. Вообще говоря, идея ввести в анализ сейсмических явлений, регистрируемых на поверхности, отношение компонент смещения волны Рэлея, не нова. В англоязычной литературе даже имеется термин, обозначающий это отношение – «ellipticity of Rayleigh waves». Получены точные и приближённые выражения для связи отношения компонент смещения с коэффициентом Пуассона для различных моделей среды (см., например, цикл работ Peter G. Malischewsky в журналах *Wave Motion* и *Ultrasonics*). Частотные зависимости этого отношения также исследуются во многих приложениях, связанных, например, с выделением волны Рэлея из сейсмических данных. Более того, есть группа итальянских геофизиков (*Gruppo Nazionale Geofisica Terra Solida*), которая ввела понятие: *The Multi-components Analysis of Surface Wave (McASW)* (см., например, [http://pure.au.dk/portal/files/52314066/GNGTS2012\\_estratto.pdf](http://pure.au.dk/portal/files/52314066/GNGTS2012_estratto.pdf)), причём разработанный ими метод предназначен как раз для анализа слоистости среды. Отсутствие в диссертации обсуждения этих вопросов, мягко говоря, не корректно.
3. Ещё одно из общих замечаний связано с принципиальным отсутствием в диссертации прямого сравнения развиваемого метода с известными. Хотелось бы увидеть, например, результаты реконструкции сдвигового модуля, полученные методом SASW, в сравнении с результатами, которые даёт PASW, причём на экспериментальных данных, полученных автором.
4. Хотелось бы также увидеть в диссертации рассуждение автора о точности методов, об источниках погрешностей, например, для метода PASW и тому подобное. Ведь конечная цель – это получение данных о физическом параметре, например, модуле сдвига, с определёнными возможностями метода точностью. В разработке метода на настоящий момент явно ощущается отсутствие этапа физического моделирования на объекте с известными характеристиками. Есть математическое моделирование, но глава, посвящённая модельной задаче, заканчивается следующим выражением (стр.53): «Как видно из рис.12, отличия дисперсионных зависимостей для моделей №1 и №2 также невелики и составляют около 1%. При этом изменение модуля отношений амплитуд проекций для

моделей №1 и №2 составляет около 4% для первой моды и достигает 20% в области низких частот для второй моды (см. рис.13). Таким образом, совместный анализ дисперсионных зависимостей и частотных зависимостей отношений амплитуд проекций вектора смещения дневной поверхности позволяет судить об особенностях строения среды». Во-первых, надо отметить, что вторая мода нигде в далее представленных экспериментах не анализируется, а во-вторых, как можно говорить о возможности «судить об особенностях строения среды» по данным, отличающимся в первые единицы процентов, если не имеется представления о точности окончательной реконструкции целевых параметров.

5. Далее, также окончание Главы 1 (стр.53): «Из гипотезы, что зависимость отношения  $u_r/u_z$  от частоты несёт достаточную информацию о распределении коэффициента Пуассона в вертикально стратифицированной среде, было предположено, что решение обратной задачи в случае учёта данного параметра становится более корректным». Сразу возникает вопрос: А где в диссертации это показано? Вообще говоря, именно этому и надо было, по крайней мере, по мнению рецензента, посвятить диссертацию.
6. В Главе 2 диссертант, приступая к описанию экспериментов (стр. 58), утверждает, что «... плотность можно задавать произвольной постоянной для всех слоёв (отношение плотностей равно единице)», обосновывая это тем, что «В дальнейшем было выяснено, что плотность не является важным параметром и, по крайней мере, для рассмотренных экспериментальных данных при изменении плотности в разумных пределах 20% дисперсионная характеристика и отношения амплитуд проекций изменялись в пределах 3-5%». Во-первых, сразу опять возникает вопрос о точности реконструкции, например, модуля сдвига. Во-вторых, в диссертации не показано то, что «В дальнейшем было выяснено...». Требуется пояснения.
7. Все эксперименты, представленные в диссертации, описаны недостаточно полно. Особенно это касается «калиброванных широкополосных геофонов», способов их установки, проверки повторяемости данных при их переустановки и тд. Особенно хотелось бы знать межосевую чувствительность геофонов, вполне вероятно, что записываемые

диссертантом данные отдельно для  $u_r$  и  $u_z$  коррелированы. При описании каждого эксперимента следовало бы привести подробную схему эксперимента. Представленные иллюстрации недостаточны.

8. При анализе экспериментов диссертант делает различные утверждения, которые вызывают вопросы.

Например, для экспериментов по водонасыщению при анализе величины отношения амплитуд проекций смещения им не анализируются частоты 125Гц (стр. 63) для естественного водонасыщения «из-за большого разброса значений» и 120Гц (стр. 72) для искусственного, так как отношение «оказалось подвергнуто сильному влиянию разрыхленного поверхностного слоя». Диапазон один и тот же, может и причина одна, причём не разрыхление?

В эксперименте по естественному водонасыщению диссертант отметил увеличение скорости волны Рэлея на низких частотах, что связал «с увеличением сжатия зёрен из-за давления со стороны вышележащих слоёв» (стр. 65). Нужны комментарии по поводу модельных соображений о том, плотность не является важным параметром.

Далее очень бы хотелось более подробных комментариев по поводу абсолютной хрупкости слоёв 5 и 6 (стр. 66) для данных эксперимента с импульсным источником, т.е. это слои на глубинах 1,5-4 метра и по керновым данным – это суглинок. Замечания автора, что «...значения коэффициента Пуассона в слоях 3-5 находятся в соответствии с моделью сухой гранулированной среды...», недостаточно, нужны оценки.

Не ясно, почему на рис. 25 (стр. 73) представлены частотные зависимости исследуемых величин для трёх состояний грунта, а на следующим за ним рис. 26 приведены результаты только для одного (начального) состояния.

Пункт 2.2, где описываются эксперименты по искусственному водонасыщению, заканчивается приведением временных зависимостей модуля сдвига и коэффициента Пуассона в приповерхностном слое при насыщении грунта водой (рис.32, стр. 77). При этом отсутствуют какие-либо обсуждения, полученных результатов, что выглядит несколько странным.

Материал, представленный на стр.78-79 не имеет, по мнению рецензента, никакого отношения к теме диссертации.

При описании результатов эксперимента по оценке трещиноватости приповерхностных слоёв (стр.84) диссертант пишет, что «Оценки по формулам [...] показывают, что видимой на рис. 34 анизотропии скорости волны Рэлея в 10% можно поставить в соответствие такое же изменение скорости волны сдвига, что отвечает концентрации трещин порядка тех же 10%...». Следовало привести эти оценки.

Далее стр.85. Диссертант пишет: «Причины немонотонного изменения частотной зависимости  $u_r/u_z$  на рис.34, справа, можно связать с расположением трещин на характерной глубине ...». Следовало привести эту связь, так как работа, на которую далее идёт ссылка, находится в печати. Описание эксперимента по оконтуриванию малоконтрастных неоднородностей, связанных с археологическими захоронениями, также крайне скудно (стр. 87). Не ясно, передвигался ли вибратор при передвижении линейки приёмных геофонов. Если не передвигался, то как обрабатывались данные. Почему в результате обработки данных не сделано реконструкций сдвиговой и продольной волн, которые и являются целью применения метода PASW, а если сделано, то почему не приведено. И вообще, не понятно было ли что-то предсказано в данном комплексном исследовании или всё, как обычно, сравнивалось с результатами окончательных раскопок?

9. В оформлении работы чувствуется некоторая неряшливость. В ней два рис.12 (стр.51, 52); импульс силы измеряется в кН, вертикальное смещение в мм/с, (стр. 59); при обозначении горизонтального смещения по всему тексту используется разные координаты, то  $x$ , то  $r$ ; формулы по всему тексту набраны в разном стиле; на рис.22 англоязычные обозначения (стр.71) и тому подобное.

Тем не менее, оценивая диссертационную работу в целом, необходимо отметить, что она является завершённой научно-квалификационной работой, которая содержит актуальные и полезные результаты теоретического и прикладного характера. Достоверность и обоснованность результатов



обеспечивается корректным применением математических методов и их экспериментальным подтверждением, соответствием полученных результатов известным фундаментальным положениям и непротиворечивостью с исследованиями других авторов по данной тематике, корректной, хотя местами дискуссионной, интерпретацией результатов. Путём обработки данных натуральных экспериментов и численным моделированием, продемонстрирована применимость полученных диссертантом результатов для совершенствования методов малоуглубинной дистанционной диагностики приповерхностных слоёв Земли.

Основные результаты диссертации отражены в 24 работах автора, из которых 5 опубликованы в профильных периодических научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов докторских и кандидатских диссертаций. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация Конькова Андрея Игоревича «Разработка и экспериментальная апробация метода когерентной малоуглубинной сейсмоакустической диагностики на основе поверхностных волн», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук отвечает требованиям ВАК, в том числе Положению о порядке присуждения учёных степеней, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – «Акустика».

Официальный оппонент:

Заведующий отделом НИРФИ  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
д.ф.-м.н., доцент

Д.А. Касьянов

14.06.2015

подпись Д.А. Касьянова заверяю  
Директор НИРФИ  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
профессор



С.Д. Снегирев

Касьянов Дмитрий Альбертович, д.ф.-м.н, доцент,  
заведующий Акустическим отделом Научно-исследовательского  
радиофизического института федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Национальный  
исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского» (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского).

Адрес: Российская Федерация. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая  
Печерская, 25/12а

Тел.: (831)4325706,

Моб. тел.: +79519185349

e-mail: da\_kasyanov@nirfi.sci-nnov.ru