

На правах рукописи



Жостков Руслан Александрович

Исследование геоакустических полей, наведенных подповерхностными
источниками в слоистой геофизической среде

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2014 г.

Работа выполнена в лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Собисевич Алексей Леонидович
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Лаборатория фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии, зав. лаб.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Разин Андрей Владимирович
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиофизический институт», в.н.с.

кандидат физико-математических наук
Гончаренко Борис Иванович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», кафедра акустики, физический факультет, с.н.с.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Защита состоится *19 февраля 2015 г. в 14:00* на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) по адресу: 123995, ГСП-5, Москва Д-242, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте института www.ifz.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



О.Г. Онищенко

ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа «Исследование геоакустических полей, наведенных подповерхностными источниками в слоистой геофизической среде» посвящена решению отдельного класса задач, связанных с совершенствованием существующих и поиском новых методов изучения волновых процессов в слоистых геофизических структурах.

Актуальность темы

Выделенный в диссертационной работе класс геофизических задач является составной частью крупной фундаментальной научной проблемы, связанной с изучением волновых процессов в геосферах Земли, порождаемых неоднородностями и локальными образованиями. Сегодня эта проблема приобретает важное государственное значение в связи с освоением новых месторождений полезных ископаемых, в том числе и на шельфе Северного Ледовитого океана. Она заставляет на новом уровне вернуться к проблеме анализа структуры волновых полей в системе «слоистая литосфера – гидросфера – ледовый покров – атмосфера».

Одним из наиболее достоверных источников знаний о внутреннем строении литосферы служат данные, получаемые на основе анализа структуры волновых процессов, наведенных в различных геосферах. При этом для исследования строения верхней части земной коры перспективными являются методы, основанные на применении поверхностных волн. Рациональное освоение месторождений требует повышения точности используемых методов, а также их адаптацию для использования в условиях покрытых льдом северных морей. В первую очередь интересны модификации, которые не усложняют процедуру полевых работ, поэтому полученные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные результаты исследования волновых структур в системе «слоистая литосфера – гидросфера – ледовый покров – атмосфера», а также предложенная методика дополнительной обработки полевых данных являются актуальными и уже востребованными на практике.

Установлено, что для правильного описания волновых полей в литосфере необходимо учитывать и влияние атмосферы. Для реализации комплексного подхода в исследовании геофизических задач требуется решать самосогласованную задачу совместного анализа волновых процессов в различных геосферах, требующую применения современных численных методов и высокопроизводительных компьютерных систем. В этой связи

полученное в диссертации развитие аналитических подходов, которые позволяют найти решения в квадратурах или асимптотические решения, признано актуальным.

Цель работы

Основная цель диссертационной работы – изучение свойств сейсмоакустических волновых процессов в системе «слоистая литосфера – водный слой – ледовый покров – атмосфера – ионосфера».

Основные задачи исследования

В процессе выполнения диссертации для достижения поставленной цели было необходимо провести анализ методов, обеспечивающих изучение свойств и строения геофизической среды. Научный обзор позволил выделить ряд неисследованных ранее задач, решение которых требовалось найти:

- 1) построение математических моделей исследуемых геофизических структур и изучение дисперсионных свойств поверхностных волн в трехслойной упругой среде;
- 2) анализ метод микросейсмического зондирования слоистой геофизической среды и построение алгоритма дополнительной обработки результатов для оптимизации процессов поиска и оконтуривания заглубленных неоднородностей;
- 3) определение дисперсионных свойств слоистой структуры «морское дно – водный слой – ледовый покров»;
- 4) проведение натурных экспериментов в рамках развиваемых теоретических задач;
- 5) исследование излучения сейсмическими волнами акустических сигналов в атмосферу;
- 6) развитие теории распространения акустических волн и импульсов конечной амплитуды в стратифицированной атмосфере с учетом как можно большего количества факторов.

Научная новизна

В диссертационной работе впервые выполнен теоретический анализ дисперсионных свойств поверхностных волн в системе «морское дно – водный слой – ледовый покров», а также проведены уникальные полевые эксперименты по приему сейсмоакустических сигналов от промышленных взрывов в системе «литосфера – гидросфера – ледовый покров». Экспериментально изучены геоакустические волновые поля вблизи границы

раздела твердого и газообразного полупространств и выполнены оценки акустических сигналов в атмосфере, наведенных сейсмическими волнами.

Разработан новый алгоритм обработки результатов применения метода микросейсмического зондирования, повышающий его точность и разрешающую способность. Проведена адаптация разведочного метода для использования в условиях покрытых льдом северных морей, что подтверждено двумя патентами (№2517780, приор. 18.06.2012; № 2515170, приор. 24.08.2012).

Развита теория распространения периодических акустических волн и импульсов конечной амплитуды в атмосфере с учетом нелинейных эффектов, вязкости и стратификации. Впервые получены решения, с высокой точностью описывающие эволюцию профиля волны на всей нелинейной стадии и проведена работа по изучению влияния температурной неоднородности на вертикальное распространение нелинейных акустических сигналов в вязкой стратифицированной атмосфере.

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертационной работе получили дальнейшее развитие современные физико-математические и геофизические методы, которые находят применение при анализе неоднородных геологических структур. Предложен принципиально новый алгоритм повышения разрешающей способности и точности широко используемого при проведении полевых работ метода микросейсмического зондирования. Показаны пути его адаптации при проведении исследований на шельфе северных морей.

Построена теория распространения нелинейных волн в атмосфере, которая может использоваться при решении ряда крупных задач геофизики, включая исследование взаимодействия литосферы и ионосферы, изучение нагрева атмосферы при землетрясениях и других событиях, определение влияния летательных аппаратов на шумовое загрязнение населенных районов.

Исходный материал

В основу настоящей работы положены новые научные результаты, полученные автором при участии в выполнении фундаментальных теоретических и экспериментальных работ в рамках Программы №4 фундаментальных исследований Президиума РАН «Природная среда России:

адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики», а так же при работе по инициативным грантам РФФИ (проекты 14-05-00762 и 14-05-31246).

В процессе работы над диссертацией автор принимал участие в пяти геофизических экспедициях, которые проводились учеными Лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии ИФЗ РАН в различных районах европейской части России.

Основные защищаемые положения:

- 1) Теоретические и экспериментальные исследования дисперсии в слоистой среде «морское дно – водный слой – ледовый покров» доказывающие, что на фундаментальную моду в большей степени влияют характеристики дна, а на изгибную моду – характеристики льда, причем эти два типа волн могут быть легко разделены по скорости распространения.
- 2) Аналитические решения для периодических волн и импульсных сигналов, распространяющихся в стратифицированной атмосфере, показывающие их существенно нелинейный характер, а также необходимость учета вязкости и неизотермичности. Предложены пути уточнения полученных решений, а также обнаружен эффект «замораживания» профиля.
- 3) Модификация метода микросейсмического зондирования, разработанная на основе изучения дисперсионных свойств поверхностных волн в трехслойной упругой среде, повышающая его точность и разрешающую способность.

Личный вклад автора

Основные результаты, полученные лично автором, включают:

- 1) научный обзор исследований по данной проблеме и самостоятельно сформулированные задачи, решение которых позволили сформулировать основные защищаемые положения;
- 2) предложение и обоснование выбора математических моделей исследуемых сред, составление системы уравнений, описывающие распространение волн в слоистых геофизических средах, и сведение их к компактному виду;

- 3) выполнение с помощью численного расчета исследования дисперсии поверхностных волн для различных соотношений между параметрами трехслойной упругой геофизической среды, включая рассмотрение системы «морское дно – водный слой – ледовый покров»;
- 4) участие в подготовке и проведении экспедиций на льду Ладожского озера, Умбозера и близ города Губкин; обработка всех экспериментальных данных, подтвердившая соответствие теоретических построений экспериментальным результатам;
- 5) развитие теории распространения нелинейных акустических волн и сигналов в вязкой стратифицированной атмосфере с применением самых современных математических методов, а также определение влияния неізотермичности на характер распространения исследуемых волн;
- 6) разработка нового алгоритма обработки результатов применения метода микросейсмического зондирования, повышающего точность и разрешающую способность этого метода и разработка модификации разведочного метода для использования в условиях покрытых льдом северных морей, что подтверждено двумя патентами (№2517780, приор. 18.06.2012; № 2515170, приор. 24.08.2012);
- 7) аналитическое определение особенности течения вязкой газонасыщенной грязебрекчии с учетом влияния силы тяжести для модели грязевого вулкана.

Достоверность результатов

О достоверности результатов проведенных в диссертационной работе исследований свидетельствуют:

- 1) корректность и обоснованность использованных экспериментальных технологий измерения сейсмических и акустических полей при проведении полевых работ;
- 2) учет всех условий применимости используемых теоретических методов, а так же ограничений, накладываемых при изучении сложно построенных геофизических структур;
- 3) совпадение закономерностей, полученных в результате теоретических построений и численного моделирования, с данными полевых работ.

Апробация работы

Основные научные положения диссертации опубликованы в 19 статьях и сборниках тезисов, из них три в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. По результатам выполненных работ получены права на два патента (№2517780, №2515170). Представление результатов и обсуждение основных положений диссертационной работы и ее отдельных частей проходило в виде докладов на 21 семинаре и конференции:

- 1) Международный молодежный научный форум "Ломоносов-2009", секция "Физика", подсекция "Геофизика", 12-15 апреля 2009 г. (доклад был отмечен дипломом).
- 2) X Всероссийская школа-семинар "Волновые явления в неоднородных средах", Московская область, дер. Красновидово, 24-29 мая 2010 г.
- 3) Сессия Научного совета РАН по акустике и XII сессия Российского акустического общества, г. Москва, 15-17 июня 2010 г.
- 4) Международный молодежный научный форум "Ломоносов-2010", секция "Физика", подсекция "Радиофизика", г. Москва, 12-15 апреля 2010 г.
- 5) Proceedings of the International Conference Days on Diffraction, Saint Petersburg, Russia, May 30 - June 3 2011.
- 6) Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества, г. Саратов, 12-15 сентября, 2011 г.
- 7) International Congress on Ultrasonics ICU, Gdansk, Poland, September 5-8 2011.
- 8) Научная конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН, г. Москва, 16 апреля 2012 г.
- 9) EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 22-27 2012.
- 10) Международный молодежный научный форум "Ломоносов-2012", секция "Физика", подсекция "Геофизика", г. Москва, 9-13 апреля 2012.
- 11) Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества, г. Таганрог, 17-20 сентября, 2012 г. (доклад был отмечен дипломом).
- 12) Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии в науке о Земле и горном деле», г. Новый Афон, Абхазия, 13-21 сентября, 2012.

- 13) EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 07-12 2013.
- 14) Научная конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН, г. Москва, 23-24 апреля 2013 г. (доклад был отмечен дипломом).
- 15) Восьмая международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», г. Геленджик, 15-21 сентября 2013 г.
- 16) Международная конференция «Методы создания, исследования и идентификации математических моделей», г. Новосибирск, Академгородок, 10-13 октября 2013 г.
- 17) Объединенный научный семинар лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии №703 и лабораторий 701, 702 и 403 ИФЗ РАН, г. Москва, 14 апреля 2014 г.
- 18) Научная конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН, г. Москва, 28-29 апреля 2014 г. (доклад был отмечен дипломом).
- 19) Двенадцатая всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», г. Санкт-Петербург, 27-29 мая 2014 г.
- 20) Междисциплинарный научный форум «Moscow Science Week 2014», г. Москва, 8-12 сентября 2014 г.
- 21) Общественный семинар по разведочной геофизике, физике осадочных горных пород и резервуаров, проведенного совместно ИФЗ РАН и НОЦ "Нефтегазовый центр МГУ", г. Москва, 11 сентября 2014 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 339 наименований. Текст изложен на 192 страницах, содержит 68 рисунков и 1 таблицу.

Благодарности

Считаю своим приятным долгом поблагодарить научного руководителя д.ф.-м.н. Собисевича А.Л. и сотрудников Лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии ИФЗ РАН, кафедры акустики физического факультета МГУ, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, концерна «Морское

подводное оружие – «Гидроприбор», которые помогали мне на всех этапах подготовки работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность затронутой темы, формулируется основная цель диссертационной работы, отмечена практическая значимость новых научных результатов, указаны объем и структура диссертации.

В **первой главе** «Современные задачи исследования упругих волн в слоистых геофизических структурах» выполнен ретроспективный анализ особенностей распространения упругих волн в неоднородных средах, включая современные геофизические методы, основанные на использовании свойств поверхностных волн типа рэлеевских. Исследования ряда актуальных задач в рамках обозначенной проблемы изложены в монографии Л.М. Бреховских [Бреховских, 1973]. В последующем эти вопросы получили развитие в работах ученых института ВМиМГ СО РАН под руководством академика Б.Г. Михайленко. Ими численно решена задача комплексного исследования упругих волновых полей в системе «неоднородная литосфера – стратифицированная атмосфера» [Mikhailenko и др., 2013]. А аналитически поверхностные волны в последние годы изучались в работе [Разин, Собисевич, 2012].

Пионерские работы по изучению распространения волн в атмосфере были выполнены в семидесятые годы прошлого столетия под руководством академика Г.С. Голицына. Было показано, что в ряде случаев допустимо рассматривать атмосферу отдельно, задавая волновые движения поверхности океана или Земли [Голицын, Романова, 1968]. Эти работы продолжены при исследовании волн в конечном слое атмосферы, достаточно тонком, чтобы пренебречь стратификацией и вязкостью, но учесть тонкую структуру температурной неоднородности и ветра [Куличков и др., 1985].

На необходимость анализа дисперсионных характеристик поверхностных волн указал в своих работах И.А. Викторов, показавший, что для практических задач необходимо изучать дисперсионные характеристики поверхностных волн для различных неоднородных сред [Викторов, 1981]. Дальнейшее развитие теории дисперсионных свойств поверхностных волн а также методов их быстрого расчета [Haskell, 1953] сделало возможным появление методов геофизической разведки, основанных на применении поверхностных волн.

По типам источников зондирующего сигнала современные методы на поверхностных волнах делятся на активные и пассивные [Tokimatsu, 1995]. В настоящее время самыми популярными и эффективными методами являются методы спектрального и мультисканального анализа поверхностных волн [Park и др., 1997]. Эти методы основаны на исследовании дисперсионных характеристик волн, т.е. они являются фазовыми, но существует метод микросейсмического зондирования [Горбатиков, 2005], использующий амплитудные характеристики.

Результаты ретроспективного анализа состояния исследований по затронутой в диссертации проблеме позволили выделить класс актуальных современных задач геоакустики слоистых сред и приступить к их решению.

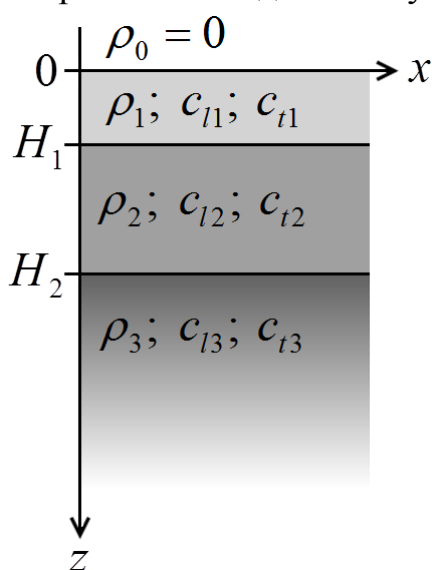


Рис. 1. Модель среды.

Во второй главе «Поверхностные волны в трехслойной упругой среде» изучены волновые процессы в модельной среде, состоящей из двух упругих слоев, лежащих на упругом полупространстве (рис. 1). Проанализирована система волновых уравнений вида:

$$\Delta\varphi_{1,2,3} - \frac{1}{c_{11,2,3}^2} \frac{\partial^2 \varphi_{1,2,3}}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta\psi_{1,2,3} - \frac{1}{c_{11,2,3}^2} \frac{\partial^2 \psi_{1,2,3}}{\partial t^2} = 0$$
(1)

и составлена система линейных алгебраических уравнений для случая жесткой сцепки между слоями (2).

$$\begin{aligned} \sigma_{xz1}|_{z=0} &= 0 \\ \sigma_{zz1}|_{z=0} &= 0 \\ u_{x1}|_{z=H_1} &= u_{x2}|_{z=H_1} \\ u_{z1}|_{z=H_1} &= u_{z2}|_{z=H_1} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \sigma_{xz1}|_{z=H_1} &= \sigma_{xz2}|_{z=H_1} & u_{z2}|_{z=H_2} &= u_{z3}|_{z=H_2} \\ \sigma_{zz1}|_{z=H_1} &= \sigma_{zz2}|_{z=H_1} & \sigma_{xz2}|_{z=H_2} &= \sigma_{xz3}|_{z=H_2} \\ u_{x2}|_{z=H_2} &= u_{x3}|_{z=H_2} & \sigma_{zz2}|_{z=H_2} &= \sigma_{zz3}|_{z=H_2} \end{aligned}$$
(2)

Полученная система имеет решение, когда характеристический многочлен матрицы C этой системы равен нулю, поэтому дисперсионное уравнение записывается как

$$\det(C) = 0$$
(3)

При численном исследовании дисперсионного уравнения (3) использовались следующие параметры геофизической среды: $\rho_1 = \rho_3 = 2000 \text{ кг/м}^3$;

$$c_{t1} = c_{t3} = 3500 \text{ м/с}; \quad c_{t1} = c_{t3} = 1700 \text{ м/с}; \quad H_1 = 1000 \text{ м}; \quad H_2 = 2000 \text{ м}.$$

Сопоставление дисперсионных кривых для разных скоростных характеристик внутреннего слоя приведено на рис. 2.

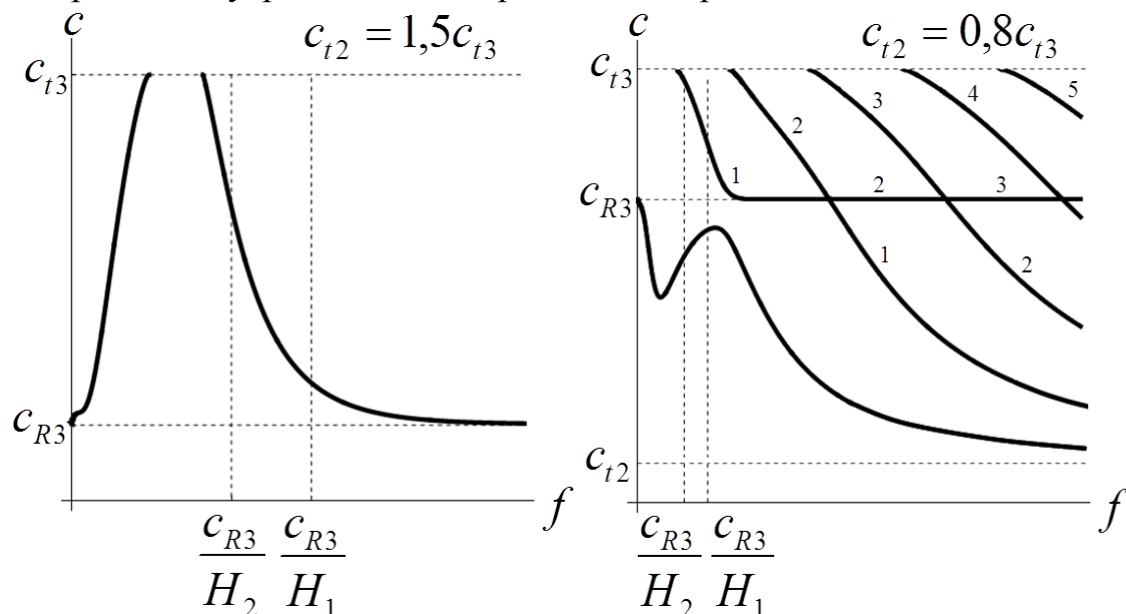


Рис. 2. Дисперсионные кривые для $c_{t2} = 1,5c_{t3}$ и $c_{t2} = 0,8c_{t3}$, соответственно. c_{R2} – скорость волны Рэлея при $c_{t2} = c_{t3}$ (однородное полупространство), цифрами отмечены высшие моды.

Из рис. 2 следует, что фундаментальная мода поверхностной волны существует всегда и преобладает на поверхности только при определенных контрастах скоростей. Так, при высокоскоростном внутреннем слое возникает диапазон частот, в котором волна не распространяется. А если внутренний слой низкоскоростной, то он превращается в волновод, и фундаментальная мода на высоких частотах распространяется в нем, а на поверхности доминируют высшие моды. При этом неоднородный слой оказывает влияние на волны, длины которых больше или сравнимы с глубиной его залегания.

Полученные результаты позволили разработать алгоритм дополнительной обработки экспериментальных данных глубинного микросейсмического зондирования геологической среды, уменьшающий технологические ошибки при интерпретации данных полевых экспериментов. Сущность предложенного метода сводится к учету поправок, вносимых вышележащими слоями при расчете влияния каждого нового слоя на поверхностную волну, что в результате позволяет получить уточненное распределение скоростных неоднородностей по глубине с учетом сложного строения геологической среды (рис. 3).

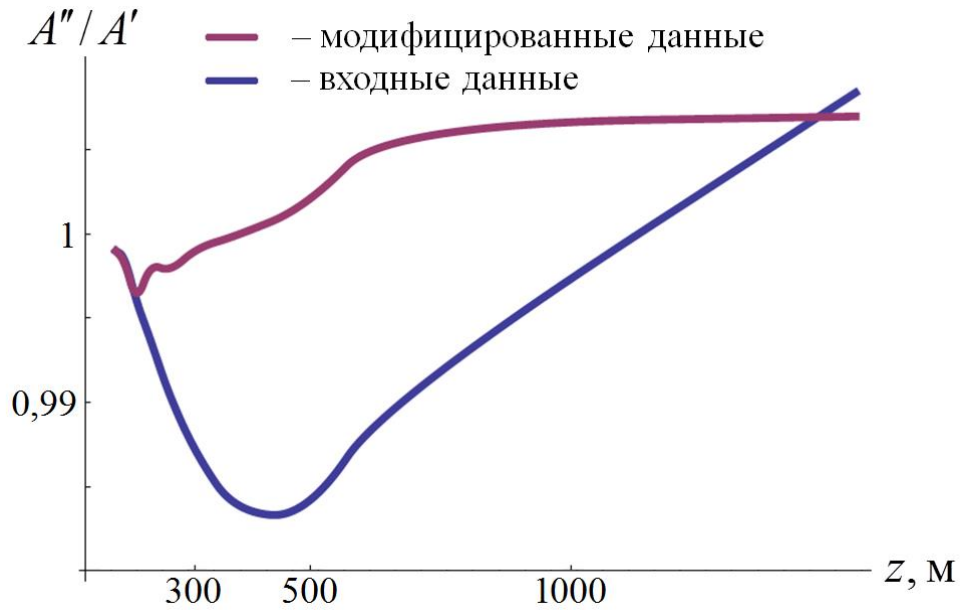


Рис. 3. Сравнение исходных синтетических данных с модифицированными в соответствии с предложенной методикой.

Необходимо отметить, что при использовании развиваемой методики приходится много раз численно решать дисперсионное уравнение типа (3), усложняющееся с добавлением каждого нового слоя. Слабое отличие суммарного влияния нескольких тонких внутренних слоев от влияния одного единственного слоя соответствующей толщины показывает, что для значительного упрощения и ускорения расчетов допустимо на каждом шаге считать среду трехслойной и рассчитывать влияние каждого слоя независимо.

Третья глава «Поверхностные волны в системе «морское дно – водный слой – ледовый покров» посвящена изучению трехслойной среды (рис. 1), когда второй слой представляет собой жидкость, т.е. при $c_{t2} = 0$. В этом случае дисперсионное уравнение получено в компактной аналитической форме:

$$\begin{aligned}
 & \omega^4 \frac{\rho_1 \rho_2}{\mu_2^2} q_1 \left[\omega^4 \frac{\rho_2 \rho_3}{\mu_3^2} q_3 \sin q_2 \Delta H + i q_2 \left((k^2 - s_3^2)^2 + 4q_3 s_3 k^2 \right) \cos q_2 \Delta H \right] \times \\
 & \quad \times \left[(k^2 - s_1^2)^2 \cos q_1 H_1 \sin s_1 H_1 + 4q_1 s_1 k^2 \sin q_1 H_1 \cos s_1 H_1 \right] + \\
 & \quad + q_2 \left[\omega^4 \frac{\rho_2 \rho_3}{\mu_3^2} q_3 \cos q_2 \Delta H - i q_2 \left((k^2 - s_3^2)^2 + 4q_3 s_3 k^2 \right) \sin q_2 \Delta H \right] \times \\
 & \quad \times \left[8q_1 s_1 k^2 (k^2 - s_1^2)^2 (1 - \cos q_1 H_1 \cos s_1 H_1) + \left((k^2 - s_1^2)^4 + 16k^4 q_1^2 s_1^2 \right) \sin q_1 H_1 \sin s_1 H_1 \right],
 \end{aligned} \tag{4}$$

Такая запись позволила проанализировать уравнение аналитически и провести сравнение его асимптотик, получаемых в низко- и

высокочастотном пределах с известными решениями для поверхностных волн.

При малых частотах ($\omega \Delta H / c_{i3} \ll 1$, $\omega H_1 / c_{i1} \ll 1$) асимптотическими решениями уравнения (4) являются: скорость волны Рэлея $c_{R3} \cong 0.9c_{i3}$, распространяющейся вдоль границы упругого полупространства, скорость изгибной волны $c_u \sim \omega^{1/2}$ и скорость $c_{np} = 2c_{i1}\sqrt{1 - c_{i1}^2/c_{i1}^2}$ «квазипродольной» волны. На больших частотах ($\omega \Delta H / c_{i3} \gg 1$, $\omega H_1 / c_{i1} \gg 1$) уравнение (4) имеет три асимптотики, две из которых соответствуют скоростям c_{S1} и c_{S3} волн Стоунли на границах «лед – вода» и «дно – вода» соответственно, третья асимптотика соответствует скорости волны Рэлея, распространяющейся вдоль поверхности льда $c_{R1} \cong 0.9c_{i1}$.

При детальном изучении уравнения (4) был выбран наиболее интересный для геофизических задач случай $c_{i2} < c_{i1} < c_{i1}$, соответствующий системе «морское дно – водный слой – ледовый покров» (рис. 4).

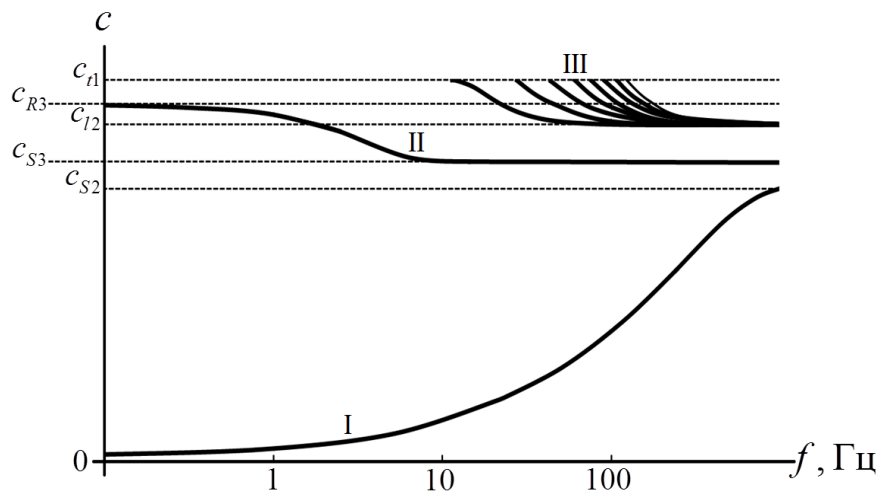


Рис. 4. Дисперсионные зависимости для параметров: $\rho_1 = 900$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 2000$ кг/м³, $c_{i1} = 3000$ м/с, $c_{i2} = 1500$ м/с, $c_{i3} = 3500$ м/с, $c_{i1} = 1700$ м/с, $c_{i3} = 1900$ м/с, $H_1 = 1$ м, $H_2 = 101$ м. Сплошными линиями обозначены: I – изгибная волна, II – «фундаментальная мода», III – гидроакустические моды. Штрихпунктирная линия отображает дисперсионную кривую изгибно-гравитационной волны.

Полученные результаты позволили выделить следующие типы волн (рис. 4):

I – низкоскоростная изгибная волна, которая существует на всех частотах и распространяется при любом соотношении фазовых скоростей продольных и поперечных волн в среде;

II – волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы упругого полупространства. В дальнейшем для этой волны будем использовать обозначение «фундаментальная мода»;

III – гидроакустические моды, характеристики которых определяются параметрами всех сред.

Определяющей возможностью использования дисперсионных кривых при обработке экспериментальных данных является их чувствительность к изменению параметров среды, а именно к толщине льда и характеристикам дна. Толщина льда может представлять интерес не только в задачах глобального экологического мониторинга, но и, например, для оценки возможности доставки грузов по льду, для организации переправ в зимнее время и т.д. Определение характеристик дна в первую очередь интересно для поиска месторождений углеводородов на шельфе.

Дисперсионные зависимости для разных значений толщины льда H_1 представлены на рис. 5. Их анализ показывает, что скорость c_ϕ фундаментальной моды практически не зависит от H_1 в рассматриваемом частотном диапазоне (кривые слились на рисунке), в то время как изменения c_u скорости изгибной моды достигают заметных значений. Дисперсионные зависимости для разных значений сдвиговых скоростей в донном грунте c_{t3} представлены на рис. 6. Дисперсия изгибной моды практически неизменна, а влияние на дисперсионные кривые фундаментальной моды весьма существенно.

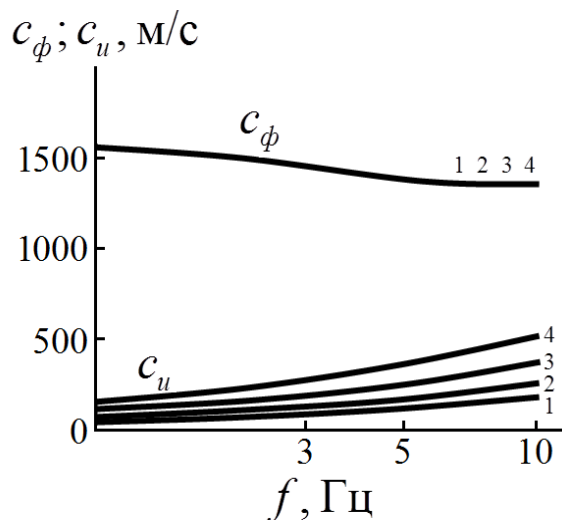


Рис. 5. Дисперсия для разной толщины льда H_1 : 1 – 1 м; 2 – 2 м; 3 – 4 м; 4 – 8 м.

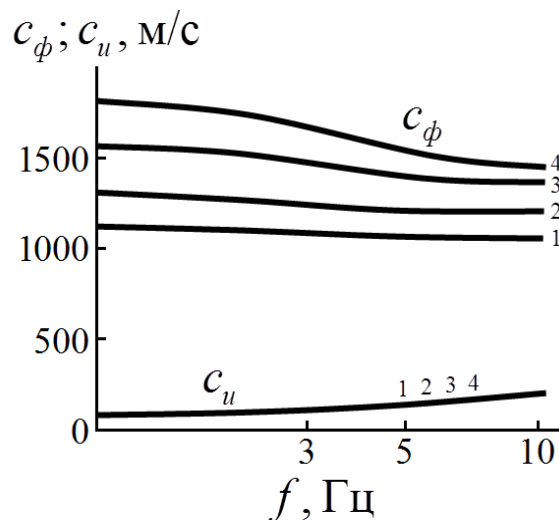


Рис. 6. Дисперсия для разной скорости c_{t3} : 1 – 1,2 км/с; 2 – 1,4 км/с; 3 – 1,7 км/с; 4 – 2 км/с.

Полученные теоретические результаты были подтверждены серией натуральных экспериментов. При проведении полевых работ в ледовых условиях помимо гидрофона и микрофона использовалось четыре типа сейсмометров: CM3-OC, GEOSPACE GS-1 3C Seismonitor, Guralp CMG-6TD и электронно-молекулярный датчик; запись велась на регистраторы Ref Tek. Схема расположения датчиков в эксперименте на Ладожском озере приведена на рис. 7.

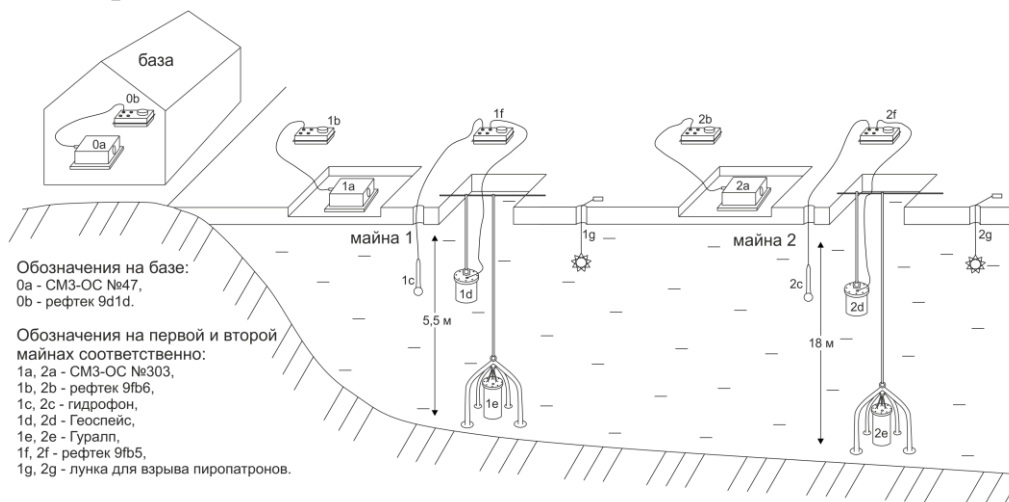


Рис. 7. Схема расположения датчиков во время работ на Ладожском озере.

В процессе эксперимента использовались два типа различных источников геоакустических волн: серия ударов о лед кувалдой на расстоянии ≈ 20 м от точки приема и мощный промышленный взрыв, произведенный на расстоянии ≈ 100 км от места проведения эксперимента.

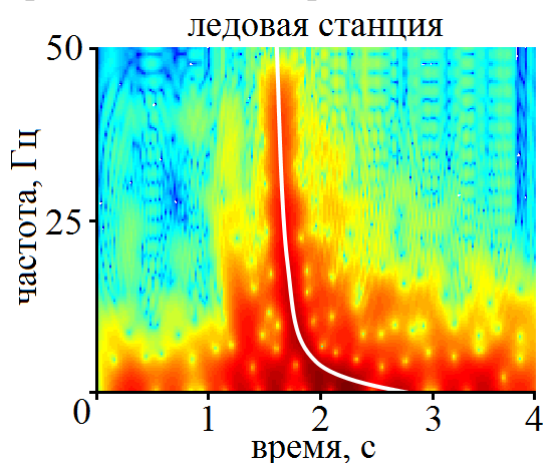


Рис. 8. Спектрограмма удара кувалдой о лед.

Подтверждено, что для первого типа источника принимаемый сигнал на ледовой станции в основном сформирован изгибной модой, на рис. 8 приведена спектрограмма одного удара. Отчетливо видна зависимость скорости прихода сигналов от частоты. Белая линия представляет дисперсионную зависимость скорости изгибной моды, рассчитанную на основе (4) для параметров, которые использовались ранее при построении рис. 4. Показано,

что теоретическая кривая хорошо согласуется с экспериментом, что указывает на правильность построенной в начале этой главы теории и одновременно на хорошее качество полученных экспериментальных данных.

В случае удаленного промышленного взрыва сигнал был представлен как изгибной, так и фундаментальной модами (рис. 9). В этом случае также было получено соответствие теоретической дисперсии и наблюдаемых данных.

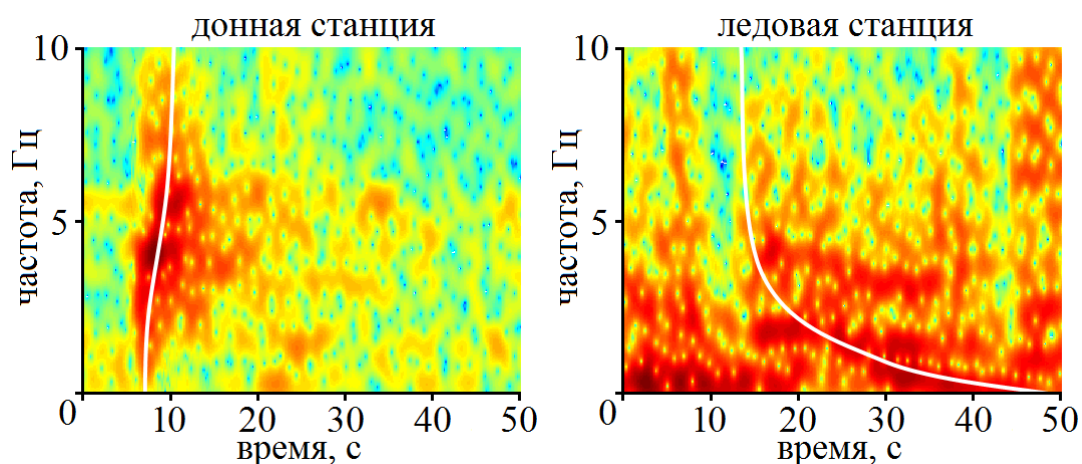


Рис. 9. Спектрограмма промышленного взрыва, записанного донной и ледовой станциями. Белой линией отмечен теоретический расчет дисперсии для фундаментальной и изгибной моды.

Последующие эксперименты с серией из трех промышленных взрывов были проведены на льду Умбозера (г. Апатиты). Аппаратура была установлена на расстоянии около 9 км от места проведения взрывов. Спектрограммы записей двух ледовых станций, находившихся на расстоянии 100 и 500 метров от берега, приведены на рис. 10.

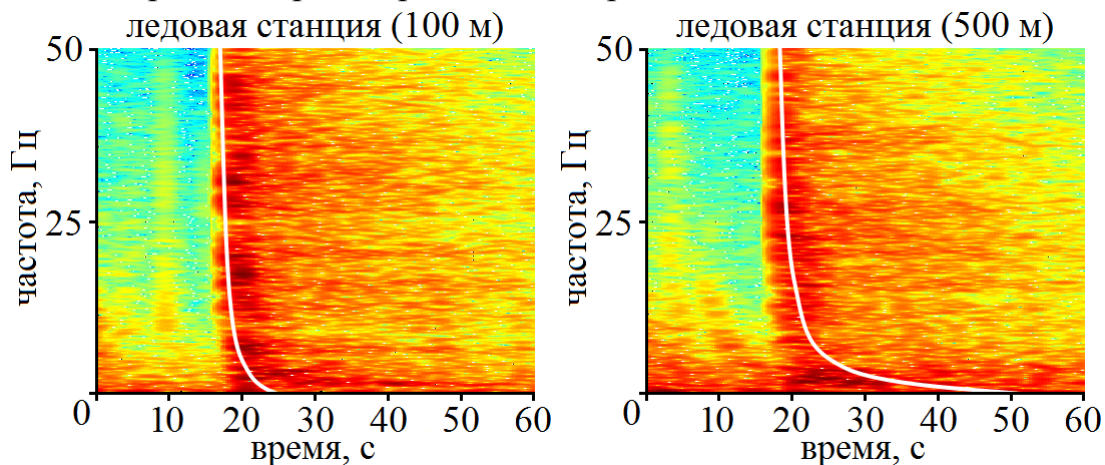


Рис. 10. Спектрограмма промышленного взрыва, записанного ледовыми станциями на расстоянии 100 и 500 метров от берега. Белой линией отмечен теоретический расчет дисперсии изгибной моды.

Проведенные натурные эксперименты позволили подтвердить развиваемые в диссертации основные теоретические положения, связанные с построением дисперсионных характеристик поверхностных волн в системе «морское дно – водный слой – ледовый покров». Полученные результаты

легли в основу патента на способ поиска углеводородов на шельфе северных морей, согласно которому сейсмогидроакустические приемные системы с нулевой плавучестью, осуществляющие регистрацию и анализ амплитудного спектра составляющих колебательной скорости по трем осям и гидроакустического давления, располагают в водном слое над поверхностью дна.

Отметим, что кроме сейсмических процессов во время эксперимента на Умбозере были получены данные по акустическим волнам в атмосфере. Изучению этой задачи в диссертации посвящена следующая глава.

В **четвертой главе** «Волны конечной амплитуды в атмосфере» основное внимание сосредоточено на теоретических исследованиях распространения акустических волн в атмосфере. Что же касается экспериментальных исследований, то о структуре сейсмоакустических волн можно судить, если обратиться к рис. 11, где сопоставлена микрофонная запись акустических волн с сейсмическими данными, полученными в ходе полевых работ на Умбозере. На записи микрофона четко выделяется сигнал, переизлученный сейсмической волной, распространяющейся вдоль поверхности, а также сигнал, пришедший по воздуху с задержкой около 27 секунд (поскольку аппаратура была установлена в 9-ти км от места проведения взрыва).

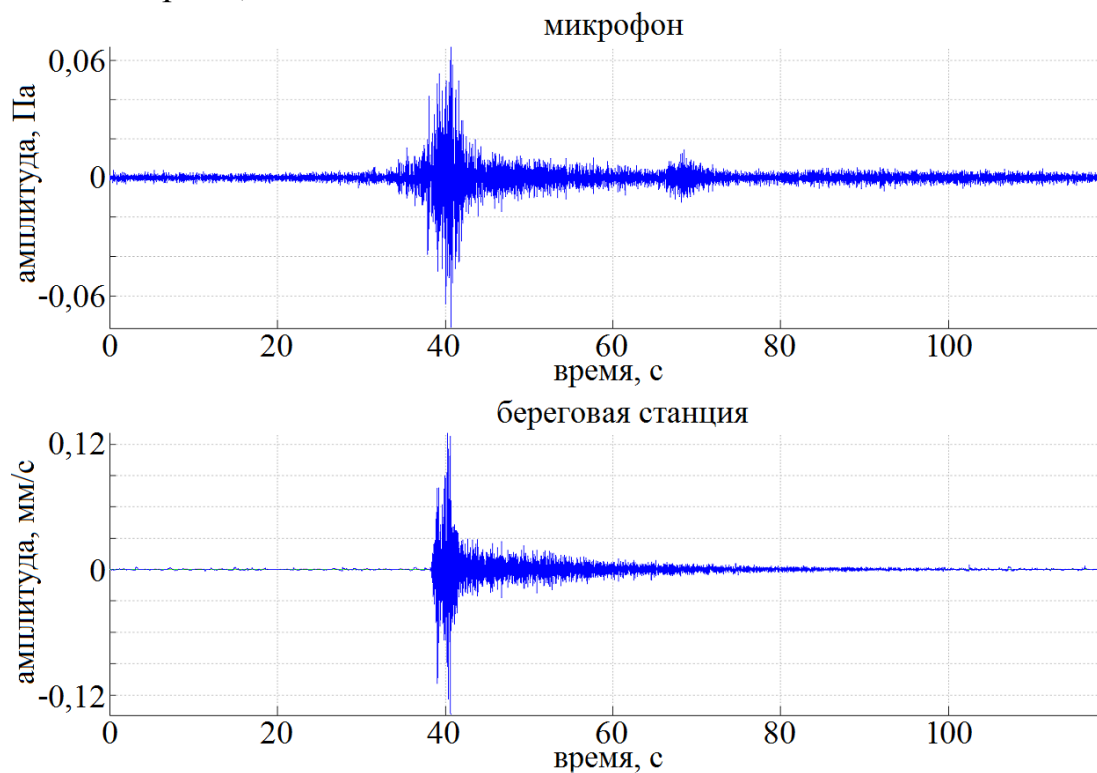


Рис. 11. Сравнение записи промышленного взрыва микрофоном и береговой станцией.

Аналогичный эксперимент по записи сейсмоакустических сигналов от промышленного взрыва был проведен недалеко от г. Губкин. Аппаратура была размещена на расстоянии около 13 км от места проведения взрыва. Во время полевых работ корреляция между акустическим и сейсмическим сигналом во время взрыва достигала 0,8, в то время как коэффициент корреляции акустического и сейсмического шума до взрыва не превышал 0,2 (рис. 12). Отметим, что при расчете корреляции был выбран участок записи, заведомо не содержащий акустический сигнал от взрыва, пришедший по воздуху. Таким образом, подтверждено переизлучение сейсмических волн в атмосферу в виде боковой клиновой волны. В этой главе приводятся результаты аналитического исследования вертикального распространения этих переизлученных в атмосферу волн с учетом стратификации, вязкости и неизотермичности атмосферы, а также нелинейных эффектов.

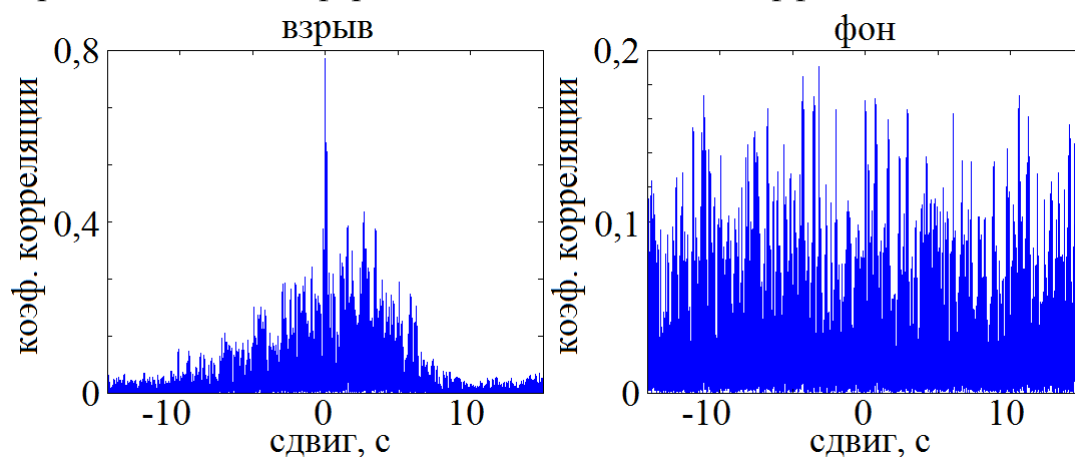


Рис. 12. Корреляция между сейсмическим и переизлученным акустическим сигналами от промышленного взрыва (слева) и между сейсмическим и акустическим фонами (справа).

В качестве исследуемой модели в диссертации выбрана стратифицированная изотермическая вязкая атмосфера. Из-за распределения плотности согласно барометрической формуле (5) амплитуда акустических сигналов экспоненциально возрастает с высотой, поэтому необходим учет нелинейных эффектов.

$$\rho_0 = \rho_{00} \exp\left[\frac{z}{H_0}\right] \quad (5)$$

Исходя из системы одномерных уравнений гидродинамики для выбранной модели с помощью метода медленно изменяющегося профиля было получено нелинейное обобщенное уравнение Бюргера (6), описывающее эволюцию сигнала

$$\frac{\partial V}{\partial s} = \Gamma \left(1 + \frac{s}{s_0} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + V \frac{\partial V}{\partial \theta}, \quad (6)$$

где введены стандартные безразмерные обозначения: V – колебательная скорость, s – вертикальная координата, θ – время, Γ – параметр, определяющий относительные вклады нелинейности и вязкости, s_0 – параметр, определяющий относительные вклады стратификации и нелинейности.

При рассмотрении поведения волны на малых высотах до образования разрыва в профиле волны, когда профиль остается достаточно гладким, уравнение (6) имеет решение в виде простых волн $V = V_0(\theta + Vs)$ (рис. 13).

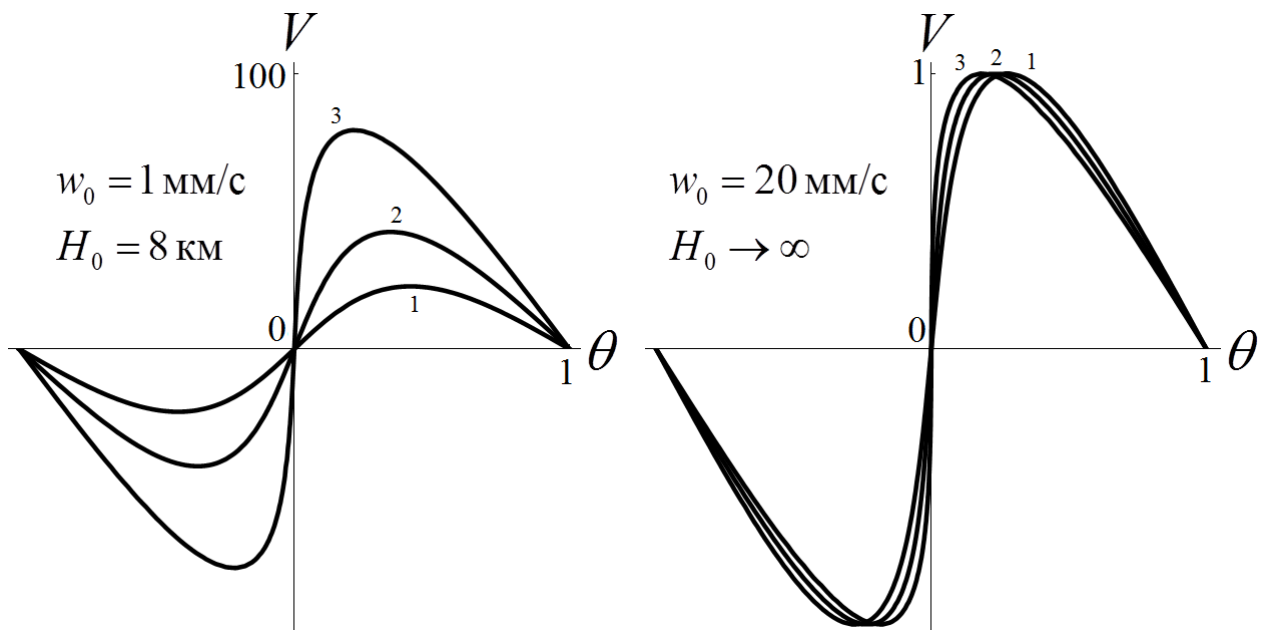


Рис. 13. Решение уравнения простых волн для случая стратифицированной (слева) и однородной (справа) атмосферы. Кривые 1-3 соответствуют высоте над уровнем моря $z = 50; 60; 70$ км. Частота начального синусоидального сигнала $f_0 = 10$ Гц. Начальная амплитуда для стратифицированной среды $w_0 = 0,001$ м/с, а для однородной среды она увеличена в 20 раз, чтобы проявились нелинейные искажения. В обоих случаях разрыв происходит на расстоянии $z_{sh} \approx 72$ км.

Решение исходного уравнения (6) получено с помощью метода сращиваемых асимптотических разложений:

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{\pi}{1+s} \operatorname{th} \frac{\pi\theta}{2\Gamma(1+s)(1+s/s_0)} + \text{поправка}, \quad -\pi < \theta < \pi. \quad (7)$$

Эта формула хорошо описывает поведение волны после образования разрыва, однако на больших высотах она неприменима. Поэтому для улучшения (7) в качестве внутреннего решения было предложено

использовать найденное автомодельное решение, описывающее структуру ударного фронта. В результате было получено решение, применимое во всей нелинейной области:

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{\pi}{1+s} \operatorname{th} \left[\Xi \frac{\pi\theta}{2\Gamma(1+s)(1+s/s_0)} \right], \quad -\pi < \theta < \pi, \quad (8)$$

$$\Xi = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 8\Gamma(1+s)^2 / \pi^2 s_0} \right)$$

Учитывая ограничения, накладываемые математической моделью, а также использовавшимися методами, были определены границы применимости полученных результатов (рис. 14).

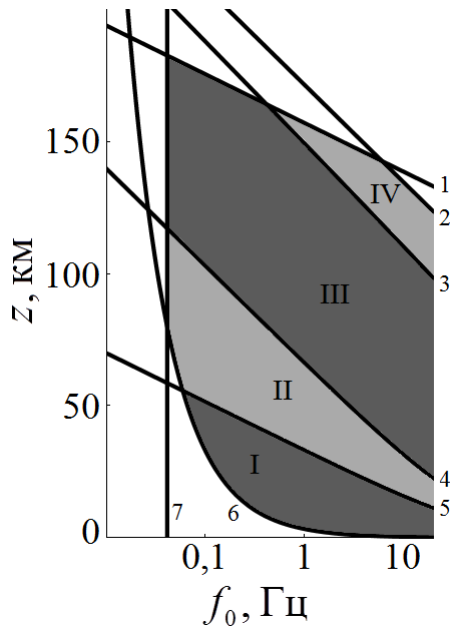


Рис. 14. Области применимости полученных решений.

Линии построены при $w_0=0,035$ м/с и обозначают следующие границы:

- 1, 6 — приближение сплошной среды;
 - 2 — обычная диссипация не мешает развитию нелинейных эффектов;
 - 3 — выход ударной волны на линейную стадию;
 - 4 — окончательное формирование ударного фронта;
 - 5 — образование разрыва;
 - 7 — приближение, связанное с применением метода медленно изменяющегося профиля.
- Закрашенные области обозначают следующие этапы эволюции волны: I — простые волны; II — формирование ударного фронта; III — ударная волна; IV — линейная стадия.

Аналогично получено решение для импульсного сигнала:

$$V_N = -\frac{\theta}{1+s} + D_N \left[\operatorname{tanh} \left(\frac{D_N \Xi_N (\theta - \theta_c)}{2\Gamma(1+s/s_0)} \right) + \operatorname{tanh} \left(\frac{D_N \Xi_N (\theta + \theta_c)}{2\Gamma(1+s/s_0)} \right) \right]$$

при $-\sqrt{1+s} + \delta\theta \leq \theta \leq \sqrt{1+s} - \delta\theta,$ (9)

$$V_N = \frac{1}{2\sqrt{1+s}} \left[\pm 1 + \operatorname{tanh} \left(\frac{\Xi_N (\theta \mp \theta_c)}{4\Gamma(1+s/s_0)\sqrt{1+s}} \right) \right] \text{ при}$$

$$\text{Здесь } \Xi_N = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 8\Gamma/D_N^2 s_0} \right), \quad D_N = \frac{1}{4\sqrt{1+s}} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{(1+s)} - \frac{8\Gamma(1+s/s_0)}{(1+s)}},$$

$$\theta_c = -1 - \frac{\sqrt{1+s} - 1}{2} - \frac{1}{4} (\sqrt{1+s} \sqrt{1 - 8\Gamma(1+s/s_0)} - \sqrt{1 - 8\Gamma}) - \frac{1}{16} \sqrt{\frac{s_0}{2\Gamma}} (8\Gamma(s_0^{-1} - 1) + 1) \times$$

$$\left\{ \arctan \left[\frac{(32\Gamma s_0)^{-1/2} (16\Gamma s - (s_0 - 8\Gamma(s_0 + 1)))}{\sqrt{1 - 8\Gamma(1+s/s_0)} + (1 - 8\Gamma)s - 8\Gamma s^2/s_0} \right] + \arctan \left[\frac{(32\Gamma s_0)^{-1/2} (s_0 - 8\Gamma(s_0 + 1))}{\sqrt{1 - 8\Gamma}} \right] \right\}.$$

Однако в силу особенностей процедуры сшивания внешнего и внутреннего решений для повышения точности пришлось использовать модификацию, согласно которой точка сшивания смещается на половину ширины ударного фронта. В качестве примера приведены профили, соответствующие изначально периодическому и импульсному сигналам (рис. 15).

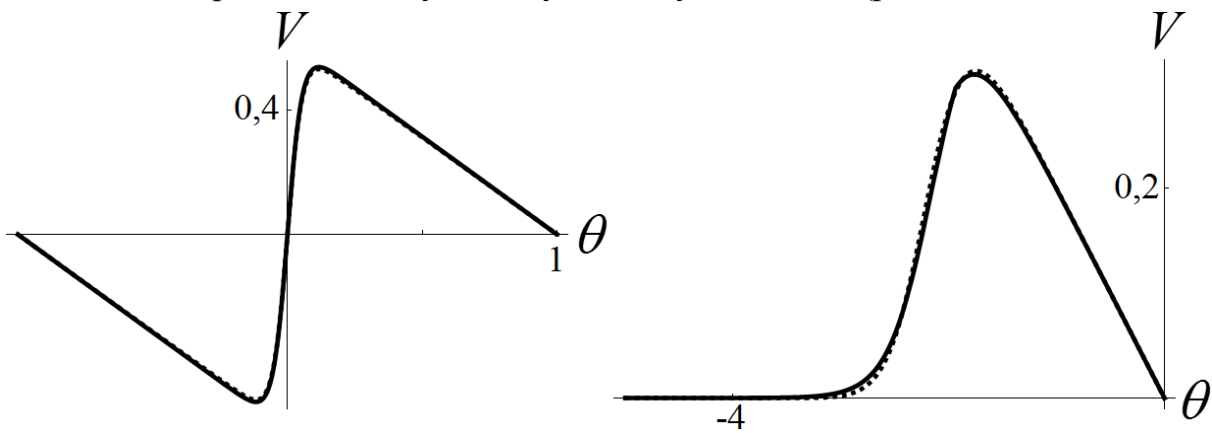


Рис. 15. Сравнение численного (пунктир) и аналитического (сплошная линия) решений для периодического и импульсного (приведен положительный полупериод) сигналов при $s=4$, $w_0=3$ мм/с.

Как видно из рис. 15, построенная в диссертации теория распространения акустических волн и сигналов в стратифицированной атмосфере хорошо соотносится с численным моделированием и, как любая аналитика, позволяет легко и быстро анализировать поведение исследуемой системы при различных параметрах. Таким образом, полученные решения применимы для задач геофизики, связанных с исследованием взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы, а также распространением звука в атмосфере от различных источников.

При изучении распространения акустических волн на длинные дистанции необходимо учитывать влияние неоднородности температуры, поскольку в ионосфере она стремительно возрастает в несколько раз, что сильно влияет на все характеристики среды.

Для линейной модели температурной неоднородности $T = T_0(1 + z/z_0)$, где z_0 – размерная вертикальная координата, было получено уравнение типа Бюргерса:

$$\frac{\partial V}{\partial s} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = \Gamma \left(1 + \frac{s}{s_0}\right)^{\left(\frac{z_0+H_0}{z_0-H_0}\right)} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2}. \quad (10)$$

Используя аналогичный подход, найдено решение этого уравнения для периодического сигнала

$$V = -\frac{\theta}{1+s} + \frac{\pi}{1+s} \operatorname{th} \left(\frac{\pi \theta}{2\Gamma(1+s) \left(1 + s/s_0\right)^{\left(\frac{z_0+H_0}{z_0-H_0}\right)}} \right) \quad (11)$$

и для импульсного:

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{1+s}} \left(1 + \operatorname{th} \left[\frac{1}{4\Gamma\sqrt{1+s}} \frac{\theta + \sqrt{1+s}}{\left(1 + s/s_0\right)^{\left(\frac{z_0+H_0}{z_0-H_0}\right)}} \right] \right), \\ \text{при } \theta < -\sqrt{1+s} \\ \\ -\frac{\theta}{1+s} + \frac{1}{2\sqrt{1+s}} \left(-1 + \operatorname{th} \left[\frac{1}{4\Gamma\sqrt{1+s}} \frac{\theta + \sqrt{1+s}}{\left(1 + s/s_0\right)^{\left(\frac{z_0+H_0}{z_0-H_0}\right)}} \right] \right), \\ \text{при } -\sqrt{1+s} < \theta < 0 \end{cases} \quad (12)$$

В диссертации предложен способ получения аналитического решения для любого вида температурной неоднородности. Для построения такого решения необходимо аппроксимировать неоднородность температуры кусочно-линейной функцией, и для каждого участка воспользоваться решением (11) или (12) в зависимости от типа начального сигнала. После это полученные решения сшиваются в граничных точках рассматриваемых линейных участков.

При анализе уравнения (10) был замечен эффект «замораживания профиля» обусловленный тем, что рост температуры, свойственный верхним слоям земной атмосферы, ослабляет факторы затухания сильнее, чем рост из-за стратификации, вследствие этого профиль становится квазистационарным, и волна распространяется на большие высоты, что проиллюстрировано на рис. 16.

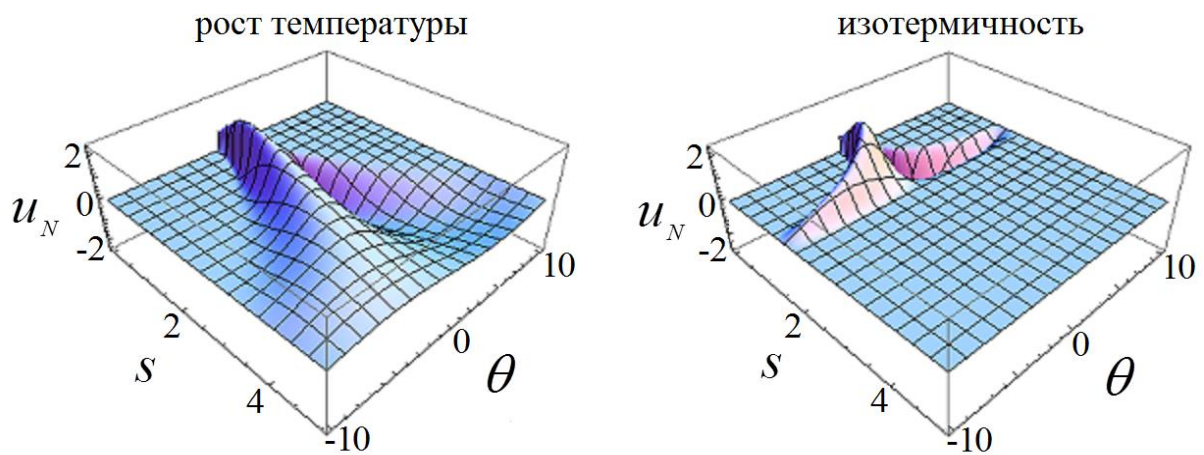


Рис. 16. Сравнение эволюции профиля импульсного сигнала для случая роста температуры с высотой и изотермического случая.

В реальной атмосфере Земли распределение температуры таково, что реализуется распространение акустических волн на сверхбольшие высоты, поэтому полученные в работе аналитические результаты для неизотермического случая оказываются особо актуальными при решении различных задач геофизики, включая исследование взаимодействия литосферы и ионосферы, изучение нагрева атмосферы при землетрясениях, определение влияния летательных аппаратов на шумовое загрязнение населенных районов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема освоения месторождений углеводородов и других полезных ископаемых на шельфе северных морей России неразрывно связана с необходимостью решения отдельного класса геофизических задач по изучению волновых процессов в системе «слоистая литосфера – гидросфера – ледовый покров – атмосфера».

В процессе выполнения диссертационной работы решена крупная научная задача и впервые получены следующие новые научные результаты:

- 1) Проведенный анализ условий распространения упругих волн в неоднородных средах и современных методов, обеспечивающих изучение определяющих свойств и глубинного строения геофизических сред с использованием технологий, основанных на применении поверхностных волн, позволил сформулировать задачи диссертационной работы.
- 2) Построена математическая модель трехслойной геофизической среды и изучены дисперсионные свойства поверхностных волн в таких структурах.

- 3) Проанализирован характер изменения дисперсионной картины поверхностных волн в зависимости от варьирования различных параметров исследуемой среды. Показано, что при слабых контрастах скоростей в трехслойном пространстве поверхностная фундаментальная мода существует и преобладает на всех частотах, а внутренний слой оказывает влияние на волны, длины которых больше или сравнимы с глубиной его залегания, причем влияние на длинные волны сильнее, чем на короткие.
- 4) Проанализирован метод микросейсмического зондирования слоистых геологических образований в составе верхних слоев литосферы и разработан алгоритм обработки данных этого метода, более точно интерпретировать геофизические разрезы, поскольку он учитывает совместное влияние множества неоднородных слоев на всех глубинах, а не одной единственной неоднородности на глубине около половины длины волны. Разработанный алгоритм нагляден и прост в использовании, и может быть реализован на базе простых вычислительных систем, и при этом не требует никаких дополнительных полевых работ.
- 5) Получены решения для истечения вязкой грязебрекчии для одно- и двухфазного течения и в случае, когда грязебрекчия вскипает на некоторой глубине при движении по выводящему каналу. Показано, как различные характеристики грязебрекчии влияют на распределение давления в выводящем канале, в частности, установлено, что наибольшее влияние на это распределение имеет плотность грязебрекчии, ее вязкость и диаметр канала, причем последние два параметра оказывают наибольшее влияние в относительно узком диапазоне значений. Также исследовано нестационарное истечение грязевой массы через канал.
- 6) Выведено в компактной явной форме дисперсионное уравнение, отражающее условия распространения геоакустических поверхностных волн в трехслойной среде с жидким внутренним слоем и определены дисперсионные свойства структуры «морское дно – водный слой – ледовый покров», включающие исследования различных типов поверхностных мод, распространяющихся в такой среде.
- 7) Изучено влияние основных характеристик изучаемой слоистой среды на поведение поверхностных волн. Установлено, что скорость изгибной моды увеличивается с частотой и стремится к скорости волны

Стоунли для границы лед-вода; скорость фундаментальной моды меняется от скорости волны Рэлея для морского дна до скорости волны Стоунли для границы гранит-вода. Также в водном слое как в волноводе распространяются гидроакустические волны, существующие на высоких частотах. Показано, что на изгибную моду наибольшее влияние оказывает толщина льда, а на фундаментальную моду – скоростные характеристики льда, это позволяет по особенностям той или иной моды судить о характеристиках различных слоев среды.

- 8) Проведены натурные эксперименты по изучению волновых процессов, наведенных промышленными взрывами в слоистой геологической среде, в ходе которых при помощи прецизионной измерительной аппаратуры были изучены сейсмоакустические сигналы в воздухе, ледовых структурах, воде, на дне и на берегу. Сопоставление экспериментальных данных с результатами теоретических построений подтвердило, что развиваемая в диссертации теория хорошо описывает свойства поверхностных волны в слоистой среде «морское дно – водный слой – ледовый покров». Полученные новые научные результаты востребованы ОАО «Концерн подводное морское оружие «Гидроприбор», что подтверждено двумя патентами (№2517780 и №2515170).
- 9) В процессе проведения экспериментальных работ было подтверждено, что сейсмические волны эффективно излучают инфразвук в атмосферу.
- 10) Проведен теоретический анализ эволюции этих переизлученных акустических сигналов в стратифицированной вязкой атмосфере. Рассмотрено уравнение простых волн для изотермической стратифицированной атмосферы и найдено его точное решение. Сравнение этого решения с соответствующим выражением для однородной среды показало, что стратификация оказывает огромное влияние на эволюцию акустического профиля и подтвердило важность учета нелинейных эффектов. Также отмечено, что, в отличие от однородной среды, предельная амплитуда периодического сигнала не стремится к нулю, а является постоянной величиной, не зависящей от начальной амплитуды.
- 11) Получено асимптотическое решение обобщенного уравнения Бюргерса и предложены пути его улучшения, позволившие обеспечить применимость этого модифицированного решения на всей нелинейной области. Речь идет о полученном в квадратурах точном автомодельном

решении этого уравнения, асимптотика которого и позволила уточнить итоговое решение.

- 12) Рассмотрен случай изначально импульсного сигнала и получены соответствующие точные и асимптотические решения. Предложена и реализована операция по смещению точки сшивания, что приводит к увеличению точности полученного решения.
- 13) Исследовано влияние неоднородности температуры на характер эволюции акустических сигналов и получены соответствующие аналитические решения для случая линейного распределения температуры с высотой. Предложена методика построения асимптотического решения для любого вида температурных неоднородностей, аппроксимируемых кусочно-линейной функцией.
- 14) Теоретически обнаружен и проанализирован эффект «замораживания» профиля, связанный с неодинаковым влиянием роста температуры на факторы, определяющие эволюцию профиля волны. Установлено, что при увеличении температуры с высотой акустические сигналы могут распространяться на гораздо большие высоты.

Публикации по теме диссертации

Из списка ВАК:

- 1) Попов Д.В., Данилов К.Б., **Жостков Р.А.**, Дударов З.И., Иванова Е.В. Обработка данных по методу микросейсмического зондирования в программном комплексе «ДАК» // Сейсмические приборы, 2013, т. 49, №2, С. 44-57.
- 2) Собисевич А.Л., **Жостков Р.А.** О движении флюидонасыщенной грязебрекчии в выводящих структурах грязевых вулканов // Геофизические исследования, 2013, т. 14, №4. С. 46-56.
- 3) Преснов Д.А., **Жостков Р.А.**, Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акустический журнал, 2014, т. 60, №4, с. 426-436.

Патенты:

- 1) Груздев П.Д., Дмитриченко В.П., **Жостков Р.А.**, Кочедыков В.Н., Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Сухопаров П.Д. «Способ поиска углеводородов на шельфе Северных морей» // Патент №2517780, приор. 18.06.2012.
- 2) Груздев П.Д., Дмитриченко В.П., **Жостков Р.А.**, Кочедыков В.Н., Нисневич М.З., Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е.,

Солдатенков В.А., Сухопаров П.Д. «Подвижная подводная автономная сейсмогидроакустическая станция разведки углеводородов на акватории арктического шельфа» // Патент на изобретение №2515170, приор. 24.08.2012.

Материалы и тезисы:

- 1) Гусев В.А., **Жостков Р.А.** Интенсивные акустические волны в стратифицированной неизотермической атмосфере // Ежегодник РАО "Акустика неоднородных сред". Сборник трудов школы-семинара под руководством проф. С.А. Рыбака. 2010. Вып. 11. С. 17-23.
- 2) Гусев В.А., **Жостков Р.А.** Интенсивные акустические волны в стратифицированной атмосфере // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сборник научных трудов под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. №18, г. Москва, МАКС Пресс, 2012 г.
- 3) **Жостков Р.А.**, Гусев В.А. Профили интенсивных сигналов, распространяющихся вертикально вверх в стратифицированной атмосфере // Сборник трудов Школы-семинара «Волны-2010», 24-29 мая 2010 г.
- 4) Гусев В.А., **Жостков Р.А.** Профили интенсивных импульсных сигналов, распространяющихся вертикально вверх в стратифицированной атмосфере // Сборник трудов Научной конференции Сессия Научного совета РАН по акустике и XII сессия Российского акустического общества, г. Москва, 15-17 июня, 2010 г., Т.1. С.200-204. М.: Геос, 2010.
- 5) V.A. Gusev, **R.A. Zhostkov**. Analytical solutions for diffraction problem of nonlinear acoustic wave beam in the stratified atmosphere // Proceedings of the International Conference Days on Diffraction' 2011, Saint Petersburg, May 30 - June 3, 2011. Pp.77-80.
- 6) Гусев В.А., **Жостков Р.А.** Вертикальное распространение интенсивных акустических сигналов в неизотермической стратифицированной атмосфере // Сборник трудов Научной конференции Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества, г. Саратов, 12-15 сентября, 2011 г., Т 2. С. 160-163. М.:ГЕОС, 2011.
- 7) Gusev V.A., **Zhostkov R.A.** Intensive acoustic wave propagating in the stratified atmosphere and acoustical influence on the atmosphere state //

Book of Abstracts of the International Congress on Ultrasonics ICU 2011, ed. by Linde B.B., Markiewicz A., and Ponikwicki N. University of Gdansk Publishing, Gdansk, Poland, 2011, p. 137.

- 8) **Жостков Р.А.** Глубинное строение лакколита Бештау // Материалы Международного молодежного научного форума "Ломоносов-2012", секция "Физика", подсекция "Геофизика", - М.: МАКС Пресс, 2012. - 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).
- 9) **R.A. Zhostkov**, Yu.P. Masurenkov, Z.I. Dudarov, S.M. Dolov, A.V. Shevchenko, and K.B. Danilov. Deep structure of the Pyatigorsk volcanic center (Northern Caucasus) // Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU2012-4299, 2012 EGU General Assembly 2012.
- 10) **Жостков Р.А.**, Масуренков Ю.П., Дударов З.И., Шевченко А.В., Долов С.М., Данилов К.Б. Исследование глубинного строения пятигорского вулканического центра методом микросейсмического зондирования // Сборник трудов Научной конференции Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества, г. Таганрог, 17-20 сентября, 2012 г., М.: ГЕОС, 2012.
- 11) Гусев В.А., **Жостков Р.А.**, Преснов Д.А. Эволюция интенсивных акустических волн в неоднородных средах в рамках обобщенного уравнения Бюргерса // Сборник трудов Научной конференции Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества, г. Таганрог, 17-20 сентября, 2012 г., М.: ГЕОС, 2012.
- 12) **Zhostkov R.A.**, Gusev V.A. The influence of viscosity and stratification of the atmosphere on the propagation of periodic and pulsed acoustic signals related to seismic processes in the Earth's crust // Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-2453, 2013, EGU General Assembly 2013.
- 13) **Zhostkov R.A.**, Gusev V.A. Features of propagation of acoustic signals in a viscous stratified atmosphere with temperature inhomogeneity // Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-2453, 2013, EGU General Assembly 2013.
- 14) **Zhostkov R.A.**, Gusev V.A., Presnov D.A. Features of propagation of acoustic signals in a viscous stratified atmosphere with temperature inhomogeneity // Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-2453, 2013, EGU General Assembly 2013.
- 15) Собисевич А.Л., **Жостков Р.А.** Результаты глубинного зондирования грязевого вулкана Шуго и расчет давления внутри выводящего канала

// Восьмая международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Россия, Геленджик. 15 – 21 сентября 2013 г.

- 16) Presnov D.A., **Zhostkow R.A.**, Gusev V.A., Shurup A.S., Sobisevich A.L. Elastic waves in ice-covered ocean // Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-7184, 2014, EGU General Assembly, 2014.