

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИЗ МОРЯ НА СУШУ

© 2019 г. А. Н. Рутенко^а, *, Д. С. Манульчев^а, С. Б. Козицкий^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43, Россия

*e-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 10.09.2018 г.

После доработки 28.11.2018 г.

Принята к публикации 26.12.2018 г.

Экспериментально и теоретически исследуются особенности распространения на сушу низкочастотных тональных и импульсных акустических сигналов, генерируемых в море. Показана точность определения характеристик сигналов и, в частности, потерь при распространении с помощью относительно простых измерительных средств (гидрофон, помещенный в небольшую емкость с водой). Продемонстрированы результаты расчетных оценок параметров звуковых полей на морском берегу, формируемых источником, работающим в водном слое. Вычисления выполнены с помощью расчетной программы, основанной на использовании параболического уравнения в горизонтальной плоскости и вертикальных волноводных мод.

Ключевые слова: сейсмоакустические измерения, распространение энергии тональных и импульсных акустических сигналов из моря на сушу, моделирование распространения импульсных сигналов в неоднородных геоакустических волноводах

DOI: 10.1134/S0320791919030079

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным освоением шельфа и строительством на берегу жилых и производственных объектов возросла актуальность корректного прогнозирования антропогенного воздействия на окружающую среду акустических шумов, генерируемых исследовательской, производственной и эксплуатационной деятельностью людей на шельфе и на берегу.

Пространственные неоднородности береговой линии и акустических свойств пород, слагающих дно, выступающие мысы и острова требуют применения трехмерного моделирования акустических полей, формируемых вибрациями фундаментов, судами, вертолетами, сейсморазведочными судами, газонефтедобывающими платформами и забивкой фундаментных свай [1–7]. Для этих целей предлагается использовать возможности численного трехмерного моделирования, опирающегося на опорные натурные измерения распространения сейсмоакустических волн в приближении вертикальных мод и параболического уравнения в горизонтальной плоскости с возможностью включения прибрежного участка суши, как в адиабатическом приближении, так и с учетом взаимодействия распространяющихся водных и водно-донных мод [8–11]. На камнях в прибреж-

ной зоне могут быть расположены лежки морских животных, и поэтому надо уметь оценивать уровни шумов не только в воде, но и в воздухе. Для этого в модельный геоакустический волновод добавляется воздушный слой с реальным рельефом суши и дна, а источник может быть расположен в воде, в дне или в воздухе, например, может представлять собой вертолет или судно на воздушной подушке. Данное направление численного моделирования, опирающееся на натурные эксперименты, активно развивается в ТОИ ДВО РАН при поддержке компании “Эксон Нефтегаз Лимитед”.

Данная работа является логическим продолжением экспериментальных и модельных сейсмоакустических исследований, проводимых на морской экспедиционной базе ТОИ ДВО РАН – МЭС мыс Шульца, результаты которых представлены в публикациях [12–15]. Ниже приводятся результаты натурных и 3-D модельных исследований, проведенных на геоакустических трассах, начинающихся в бухте Витязь и заканчивающихся на мысе Шульца.

В предшествующих работах [12–14] мы уже представляли некоторые результаты акустических экспериментально-теоретических исследований, проведенных в данном районе шельфа Японского моря с применением подобного изме-

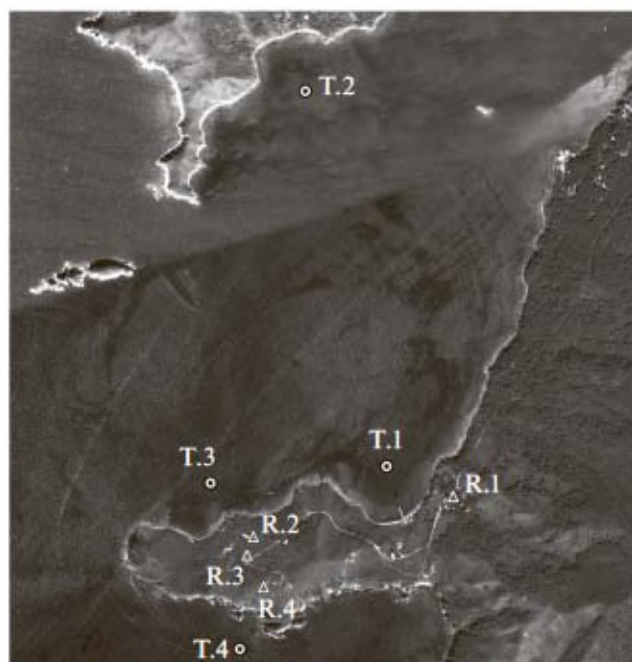


Рис. 1. Карта-фотография района исследований с указанием точек излучения акустических сигналов в море и точек на берегу, в которых эти сигналы принимались.

рительного комплекса аппаратуры и программного обеспечения для моделирования распространения непрерывных сейсмоакустических волн в приближении широкоугольного параболического уравнения, а также 3-D модового параболического уравнения (МПУ) для распространения акустических импульсов. В этих работах исследовались особенности распространения энергии низкочастотных сейсмоакустических волн в неоднородных геоакустических волноводах, характерных для шельфа, в том числе с сухопутными участками. С помощью согласованного с экспериментальными данными численного моделирования показана возможность расширения результатов натурных измерений на другие гидрологические условия, частоты и трассы распространения.

В данной работе приводятся результаты специальных экспериментально-теоретических исследований, проведенных на шельфе Японского моря в бухте Витязь (см. рис. 1) и на мысе Шульца полуострова Гамова, целью которых было изучение особенностей и потерь при распространении на мыс Шульца энергии акустических тонального и импульсного сигналов, генерируемых в море. На берегу акустические сигналы регистрировались на грунте с помощью гидрофона, установленного в 5-литровой пластиковой бутылке, наполненной водой, а также с помощью гидрофона, опускаемого в 90-метровую скважину, заполненную водой. Результаты измерений сравниваются с модельными расчетами.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Низкочастотный тональный акустический сигнал генерировался в море с помощью свешиваемого с борта судна резонансного излучателя электромагнитного типа [16], а низкочастотные импульсные сигналы генерировались оригинальным пневмоизлучателем [17], свешиваемым с бака заякоренного судна на глубину 8 м. Измерения вариаций акустического давления проводились в частотном диапазоне 2–2000 Гц с помощью гидрофонов типа ГИ-50 трех цифровых радиобуев – ЦРБ [18]. Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона P_0 , закрепленного на расстоянии 1 м от центра резонансного излучателя электромагнитного типа, опускаемого с кормы судна “Малахит” на глубину 10 м, расстояние между этим гидрофоном и пневмоизлучателем было равно ≈ 18 м.

На берегу акустические измерения проводились гидрофоном P_1 , опущенным на заданный горизонт в заполненную водой скважину глубиной 90 м, а также с помощью гидрофона P_2 , установленного в пятилитровой пластиковой бутылке, заполненной водой. Вместо P_2 к ЦРБ мог быть подключен геофон типа А0515, который обеспечивал измерение вертикальной компоненты колебательной скорости V_z в частотном диапазоне 0.1–100 Гц. В этой статье значения спектральной плотности мощности вариаций акустического давления $p(t)$, измеренных с помощью гидрофонов, представляются в децибелах по отношению к $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$, а для вариаций компоненты колебательной скорости V_z мы используем относительные единицы – отн. ед., и, соответственно, оценка их спектра представлена в децибелах без привязки к абсолютным единицам колебательной скорости. Геофон устанавливался на поверхности грунта. Цифровые радиотелеметрические каналы от трех ЦРБ обеспечивали на береговом посту синхронный ввод в ЭВМ измеряемых сигналов, их визуализацию и последующий спектральный и корреляционный анализ.

Важной задачей данной работы является экспериментальное исследование особенностей распространения акустических волн, генерируемых в водном слое из моря на сушу. Результаты натурных измерений сравнивались с результатами моделирования с помощью оригинальной программы, основанной на модовом параболическом уравнении для 3-D геоакустического волновода, включающего три слоя – воздух, воду и грунт. Моделирование проводится в приближении вертикальных мод и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости. Данная программа позволяет рассчитывать тональные и импульсные акустические поля, формируемые в

воде, в дне и на берегу, в данном случае от акустического источника, расположенного в воде.

В данной работе приводятся экспериментальные и модельные значения потерь при распространении, которые рассчитаны с помощью спектрального анализа результатов синхронных измерений по алгоритму $TL(f = f_0, r, z) = 10 \lg(G(f = f_0)/G_{1m}(f = f_0))$, где $G_{1m}(f = f_0)$ – спектр акустического сигнала с частотой f_0 , измеренного с помощью опорного гидрофона P_0 , а $G(f = f_0)$ – спектры, полученные с помощью гидрофонов P_1 и P_2 .

При численном моделировании по сигналу, измеренному опорным гидрофоном, с помощью МПУ в приближении 3-D геоакустического волновода строится точечная эквивалентная функция источника S [19], и уже для нее рассчитывается импульсное акустическое поле, формируемое в модельном 3-D волноводе, параметры которого подбираются с помощью предварительного моделирования, согласованного с экспериментальными измерениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ДАТЧИКОМ V_z

На рис. 1 приведена карта-фотография района исследований с указанием точек излучения тональных и импульсных акустических сигналов. В этих точках судно “Малахит” становилось на якорь, и с его кормы на горизонт 10 м опускался резонансный излучатель электромагнитного типа, который генерировал низкочастотный тональный сигнал – ТОН-27 Гц, уровень излучения мог достигать 180 дБ отн. 1 мкПа²/Гц. Кроме того, с борта этого судна в районе бака в воду опускался импульсный излучатель пневматического типа. Его акустический сигнал также контролировался с помощью опорного гидрофона P_0 , установленного на корпусе тонального излучателя. Первый эксперимент был проведен в июле 2014 года.

В этом эксперименте низкочастотные импульсные сигналы, излученные в точках Т.2, Т.3 и Т.4, были приняты с помощью геофона V_z , установленного на мысе Шульца на грунте в точке R.4 (см. рис. 1), которая расположена на высоте 83 м по отношению к уровню моря. На рис. 2 представлены результаты этих измерений. На этом рисунке показаны вариации акустического давления $p(t)$, измеренные с помощью опорного гидрофона P_0 во время излучения в точке Т.3, и вариации вертикальной компоненты колебательной скорости V_z в относительных единицах, измеренные в точке R.4. На рис. 2б показаны спектры этих сигналов. На рис. 2в представлены спектры $G(f)$, опорного сигнала и V_z , измеренные во время излучения низкочастотного импульса в точке Т.2, удаленной от точки приема R.4 на 2 км. Согласно этому рисунку, акустическая энергия, генерируе-

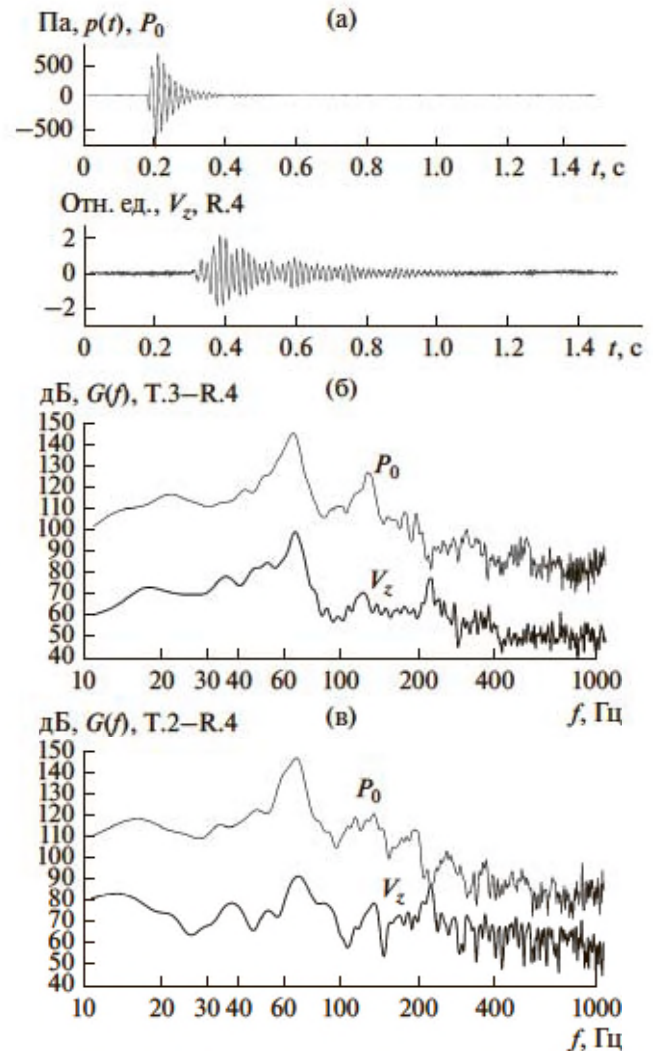


Рис. 2. (а) Вариации акустического давления, измеренные опорным гидрофоном P_0 , и вариации вертикальной компоненты колебательной скорости V_z , соответствующие излучению акустического импульса в точке Т.3 и (б) их спектры. (в) Спектры сигналов, измеренных во время излучения акустического импульса в точке Т.2.

мая импульсным пневмоизлучателем в бухте Витязь, в обоих случаях дошла до почти верхней точки мыса Шульца (83 м) в виде затянутого импульса с хорошо выраженным пиком мощности в графике спектра на частоте 64 Гц. Разность потерь при распространении для двух трасс протяженностью 2 и 0.5 км примерно равна 10 дБ. По-видимому, это объясняется тем, что от точки излучения Т.2 до точки Т.3 акустический импульс распространялся в водном слое с относительно малыми потерями.

На рис. 1 видно, что южный берег мыса Шульца представляет собой обрывистые скалы. Глубина моря в точке излучения Т.4 была равна 37 метрам. На рис. 3 показаны графики вариаций P_0 и

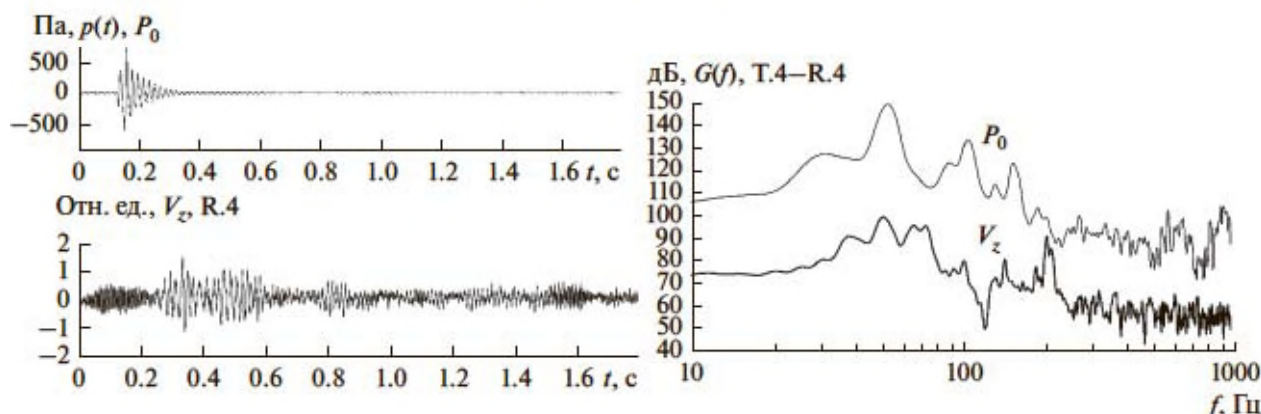


Рис. 3. Вариации опорного акустического давления P_0 и вертикальной компоненты колебательной скорости V_z при излучении сигнала в точке Т.4 и их спектры.

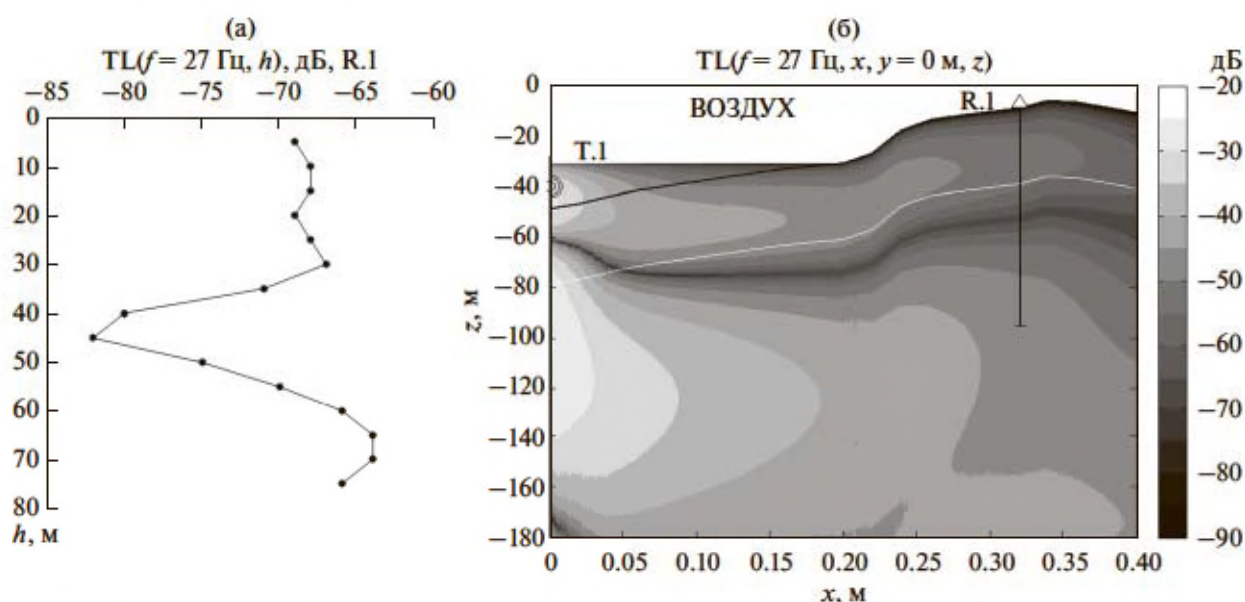


Рис. 4. (а) Вертикальный разрез потерь при распространении, полученный с помощью скважинного гидрофона P_1 в точке R.1, и (б) результаты численного моделирования потерь при распространении акустического сигнала частоты 27 Гц, генерируемого в точке Т.1 на горизонте 10 м.

V_z , измеренные во время излучения импульсного сигнала на горизонте 8 м в точке Т.4. На этом рисунке видно, что при длительности опорного сигнала P_0 0.2 с длительность сигнала, измеренного на мысе Шульца в точке R.4, составляет не менее 1.4 с. По-видимому, это вызвано отражениями от практически вертикальной до глубины 20–25 метров скалистой извилистой береговой линии со сложным рельефом (см. рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОФОНОВ

В октябре 2014 г. акустические измерения проводились только с помощью гидрофонов. Гидрофон P_1 опускался в скважину, пробуренную на мы-

се Шульца для сбора питьевой воды. На рис. 1 она обозначена как точка приема R.1. Скважина удалена примерно на 150 м от уреза воды и имеет глубину 90 м. Ее верхнее отверстие расположено на высоте 22 м по отношению к уровню моря. Во время акустических измерений уровень воды в скважине составлял 10 м. В результатах, представленных ниже, параметр h – это расстояние от уровня воды в скважине, поэтому $h = 80$ м (см. рис. 4) соответствует глубине 90 м от поверхности земли.

На рис. 4 представлены вертикальный разрез потерь при распространении, полученный с помощью скважинного гидрофона P_1 в точке R.1, и результаты численного моделирования потерь при распространении акустического сигнала ТОН-27 Гц, генерируемого в точке Т.1 на гори-

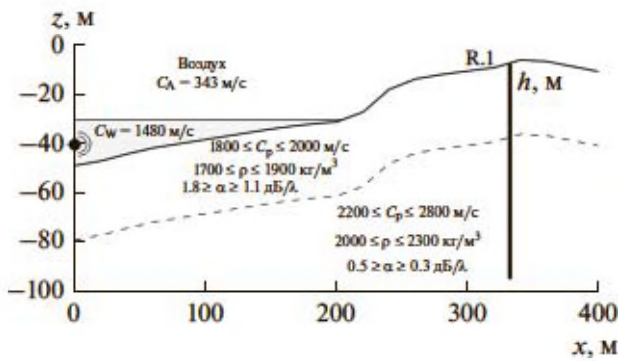


Рис. 5. Параметры модельного геоакустического волновода, использовавшиеся в расчетах.

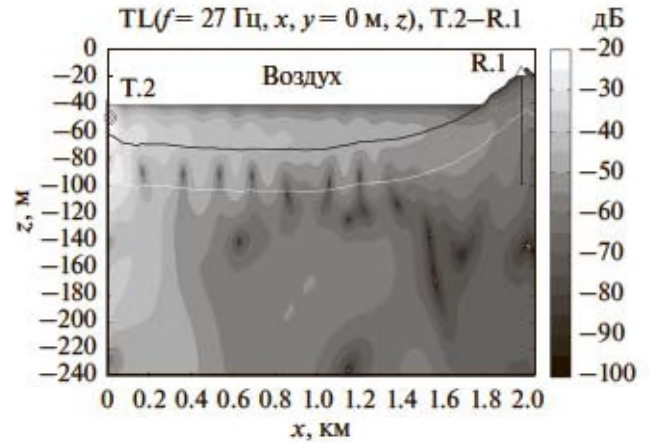


Рис. 6. Потери при распространении сигнала ТОН-27 Гц вдоль трассы Т.2–R.1. При моделировании учитывались пять не взаимодействующих мод.

зонте 10 м. Расстояние от излучателя в точке Т.1 до скважины в точке R.1 составляет 320 м.

На графике $TL(f = 27 \text{ Гц}, h)$ на глубине $h = 45 \text{ м}$ хорошо выражен пик потерь, достигающий величины -83 дБ . У поверхности и на глубине 70 м потери уменьшаются до -68 и -65 дБ соответственно. Численное моделирование, проведенное для волновода с параметрами, показанными на рис. 5, иллюстрирует пространственные характеристики геоакустического поля, формируемого в море и на суше данным источником. Профили дна моря и высот суши построены по данным судового эхолота и GPS, а подбор физико-акустических параметров грунта ориентировался на результаты

предыдущих работ, выполненных для того же района [12–14].

На рис. 6 показана модельная функция потерь для сигнала ТОН-27 Гц, генерируемого в точке Т.2 на глубине 10 метров и распространяющегося вдоль геоакустической трассы Т.2–R.1. Моделирование выполнено для акустических параметров, показанных на рис. 5, с помощью МПУ в адиабатическом приближении для пяти нормальных мод. На рис. 7 показаны экспериментальные и модельные значения потерь в зависимости от

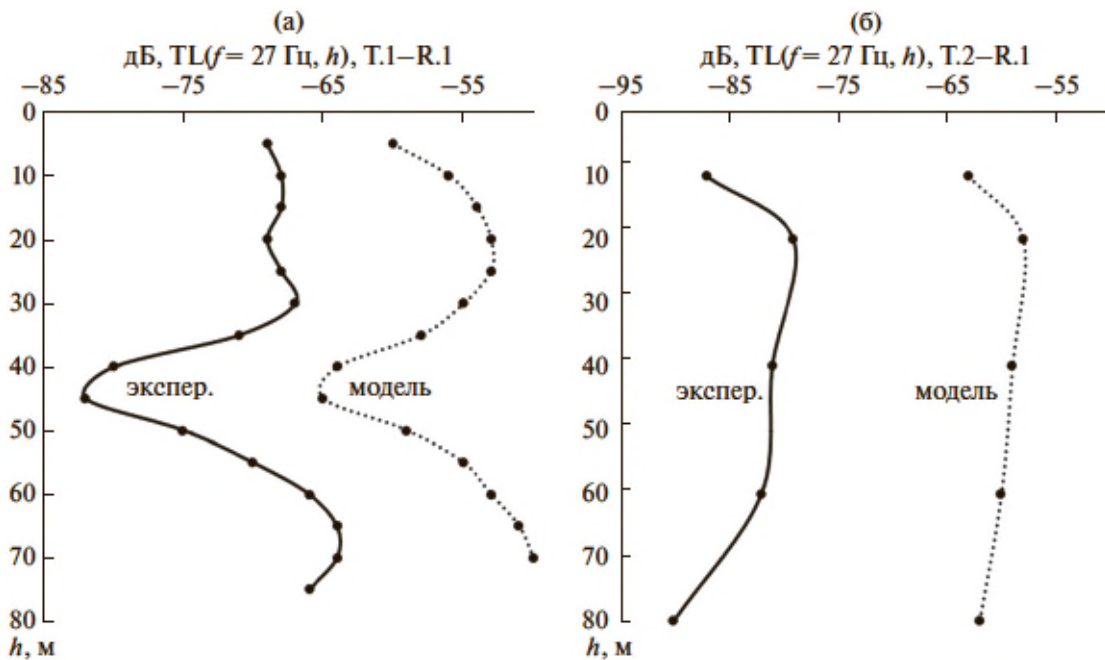


Рис. 7. Вертикальные разрезы экспериментальных (сплошная кривая) и модельных (пунктирная кривая) значений потерь TL для сигнала ТОН-27 Гц для трасс (а) Т.1–R.1 (рис. 4) и (б) Т.2–R.1 (рис. 6) в зависимости от горизонта его приема h в скважине.

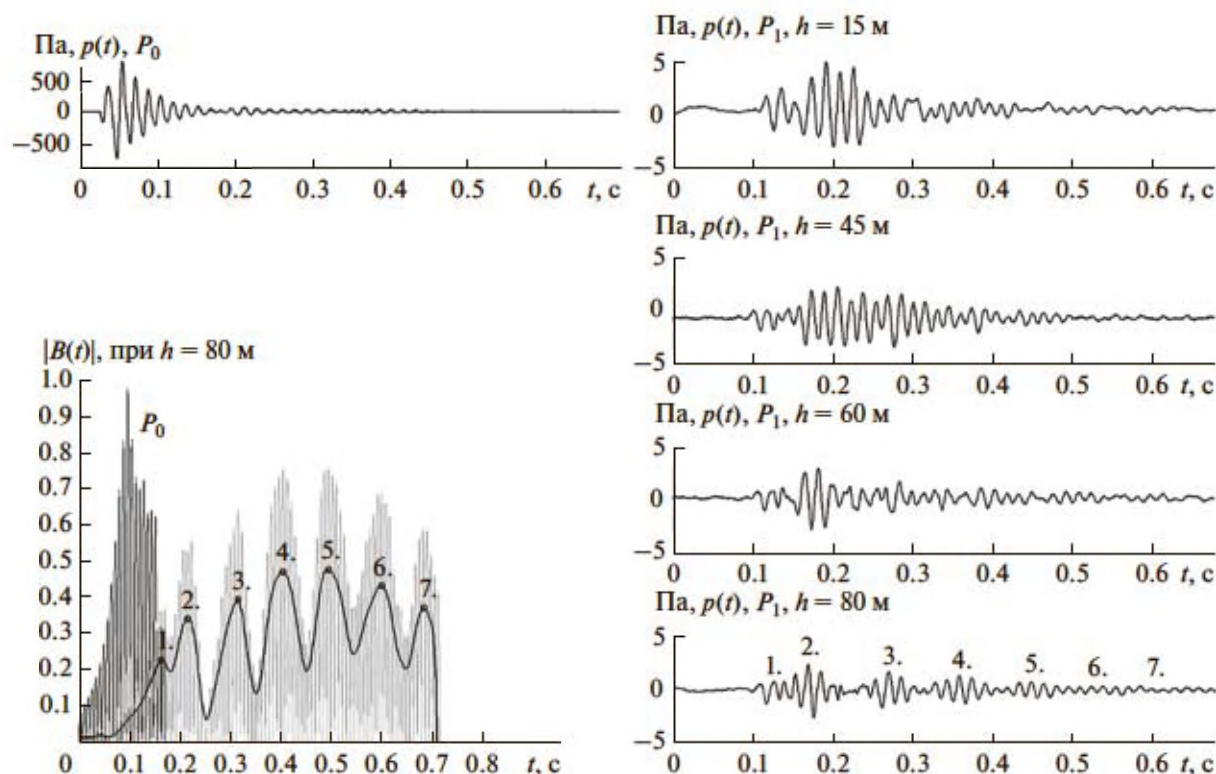


Рис. 8. Вариации опорного акустического давления P_0 , измеренные на расстоянии 18 м от пневмоизлучателя, и акустического давления P_1 в скважине на четырех горизонтах. Модуль взаимной корреляционной функции $|B(t)|$ между опорным сигналом и акустическим сигналом в скважине на горизонте 80 м.

величины h для трасс Т.1–R.1 и Т.2–R.1, имеющих протяженность 334 м и 2 км соответственно. На этом рисунке видно, что модельные значения на 10–20 дБ меньше, чем экспериментальные. По-видимому, это связано с дополнительными потерями при переходе продольных волн из грунта в скважину, представляющую собой металлическую трубу, заполненную водой.

На рис. 8 приведены акустические импульсы, измеренные в море на расстоянии 18 м от пневмо-

излучателя P_0 и на мысе Шульца P_1 в скважине с водой на четырех горизонтах, а также показаны значения модуля взаимной корреляционной функции $|B(t)|$ между опорным сигналом и сигналом, измеренным в скважине на горизонте 80 м.

В табл. 1 представлены результаты взаимного корреляционного анализа – время и скорость распространения энергии сейсмоакустических волн, генерируемых пневмоизлучателем в море в точке Т.1 (см. рис. 1) и сформировавших пакет из семи импульсов на берегу в скважине на горизонте 80 м (см. рис. 8). Согласно графикам $p(t)$, представленным на рис. 8, и значениям скорости распространения, приведенным в табл. 1, сейсмоакустические волны, сформировавшие на всех четырех горизонтах импульсы с наибольшими амплитудами, распространялись со средним значением скорости, равным 2800 м/с.

По-видимому, скорости распространения со значениями, равными 1084 м/с и меньше, обусловлены переносом энергии генерируемого в воде низкочастотного акустического импульса в грунте поперечными и поверхностными волнами, а также возможными последовательными отражениями от какой-то границы раздела.

Для оценки влияния рельефа суши и акустических свойств пород, слагающих мыс Шульца, на

Таблица 1. Время и скорость распространения импульсных акустических сигналов, излученных в море и измеренных на берегу в скважине на горизонте 80 м

Скважина R.1, $h = 80$ м, расстояние 334 м		
№ импульса на рис. 8	время, с	скорость, м/с
1	0.0667	5015.0
2	0.1184	2825.2
3	0.219	1527.4
4	0.3084	1084.6
5	0.3987	839.0
6	0.5037	664.1
7	0.5867	570.1

Таблица 2. Экспериментальные и модельные значения потерь для тонального сигнала, излученного в точке Т.3 и принятого на мысе Шульца в точках R.2, R.3 и R.4. Для каждой точки указывается ее высота над уровнем моря (положительное значение) или глубина моря (отрицательное значение)

Название точки	Высота (+) или глубина (-) в этой точке, м	x – расстояние до точки излучения Т.3, м	TL($f=27$ Гц, x), дБ	
			экспер.	модель
R.2	32	312	-52	-72.4
R.3	49	369	-70	-72.2
R.4	83	533	-82	-77.5
Т.3	-20.2	0		

распространение акустических импульсов, генерируемых в бухте Витязь, были проведены измерения тональных и импульсных сигналов с помощью гидрофона P_2 , установленного в пятилитровой пластиковой бутылке с водой. Излучение производилось в точке Т.3, а прием осуществлялся в точках R.2, R.3 и R.4, показанных на рис. 1. Результаты анализа экспериментальных данных и

численного моделирования для сигнала ТОН-27Гц представлены в табл. 2.

На рис. 9 показано модельное поле, рассчитанное с помощью МПУ для геоакустического волновода с акустическими параметрами, представленными на рис. 5, но при вычислениях учитывались пять взаимодействующих мод. Здесь надо отметить, что при моделировании мы ис-

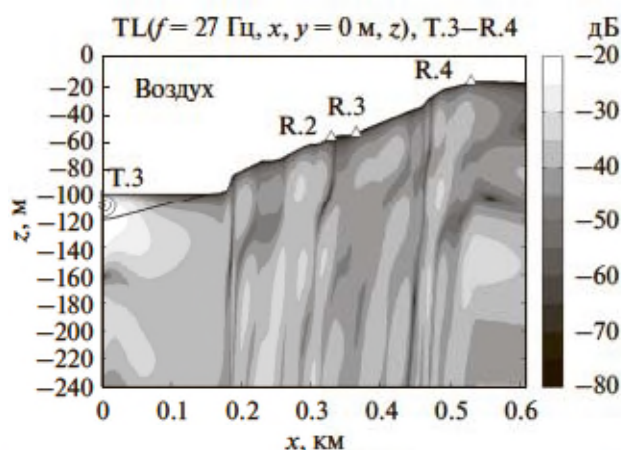


Рис. 9. Функция потерь TL при распространении сигнала ТОН-27 Гц вдоль трассы Т.3–R.4. При моделировании учитывались пять взаимодействующих мод.

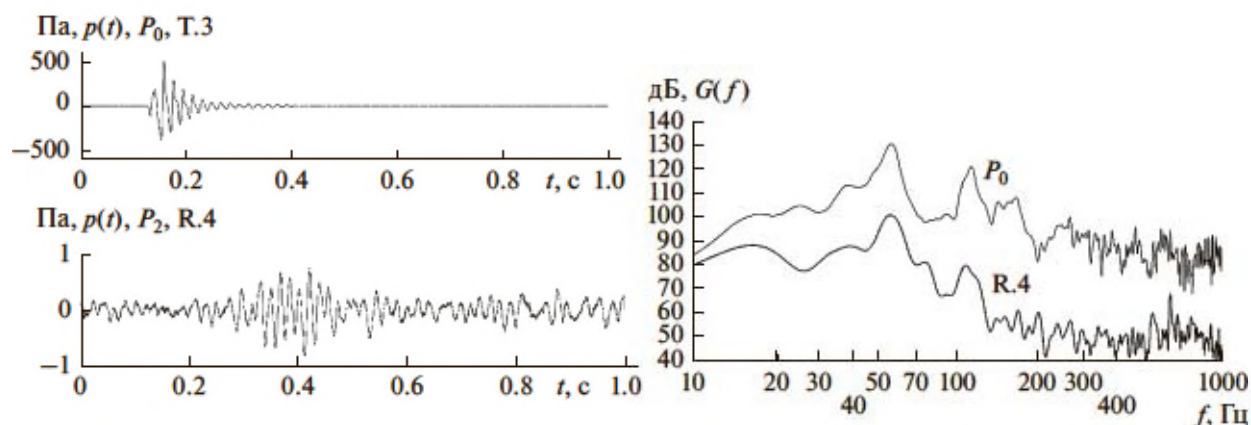


Рис. 10. Графики вариаций акустического давления, измеренные с помощью опорного гидрофона P_0 в море, и гидрофона P_2 , установленного в пятилитровой пластиковой бутылке на грунте в точке приема R.4, и их спектры $G(f)$.

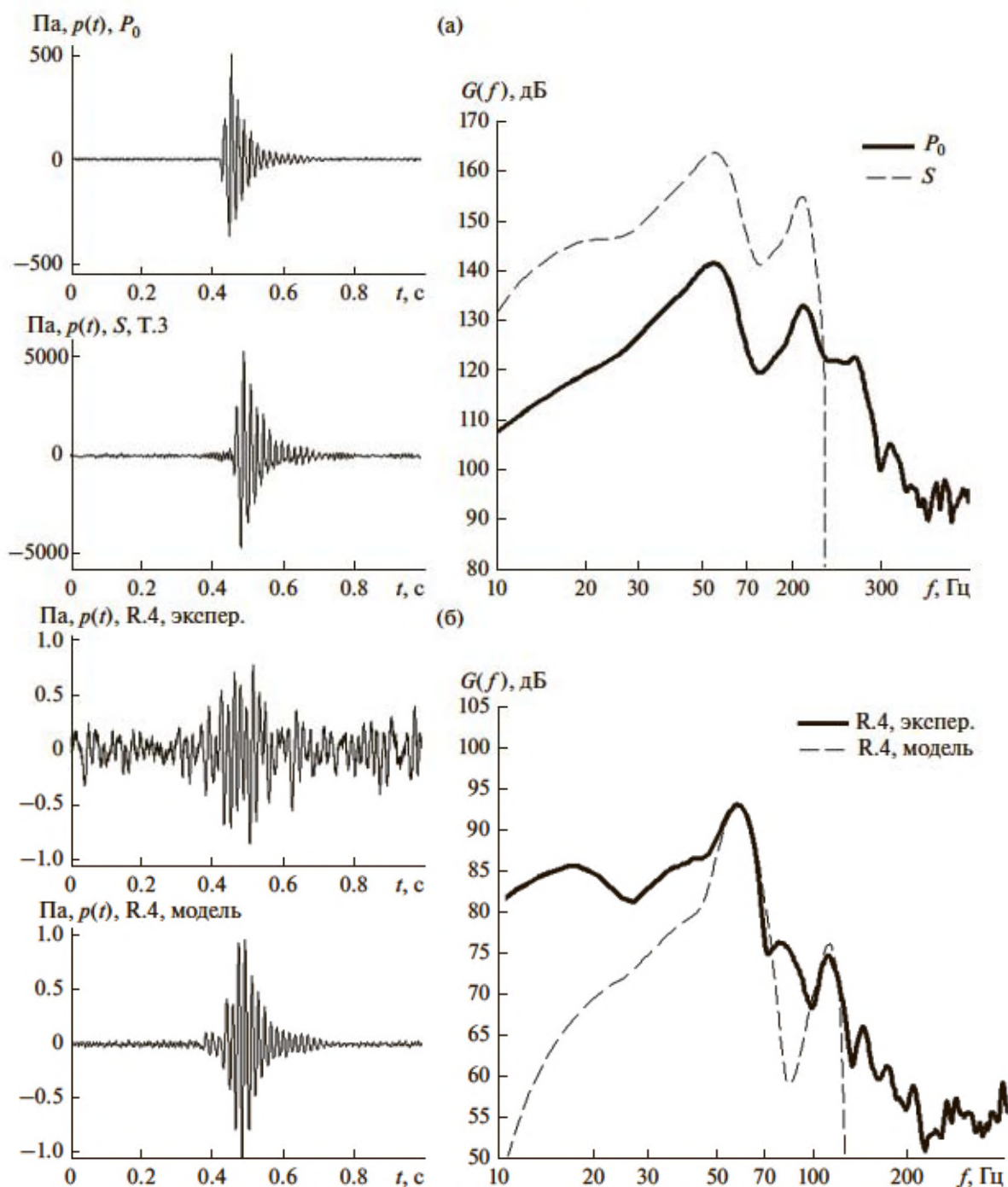


Рис. 11. (а) Эквивалентная точечная функция S пневматического импульсного источника, построенная с помощью МПУ по акустическому сигналу, измеренному в море с помощью опорного гидрофона P_0 в точке Т.3, и их спектры. (б) Акустический импульс, измеренный гидрофоном P_2 на мысе Шульца в точке R.4, и модельный импульс, рассчитанный с помощью МПУ для эквивалентной функции источника S , и их спектры.

пользовали сетку с шагами $z = 0.5$ м, $y = 1$ м и $x = 2$ м, и для сравнения с экспериментальными данными мы взяли значение модельных потерь $TL(f = 27$ Гц) для z на 1 м ниже поверхности грунта, на котором стояла пластиковая пятилитровая бутылка с водой и гидрофоном P_2 .

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА

На рис. 10 показаны вариации акустического давления, измеренные с помощью опорного гидрофона P_0 в море на глубине 10 м в точке Т.3 и с помощью гидрофона P_2 , установленного в бутылке.

ли с водой на грунте в точке R.4. На этом рисунке представлены спектры этих импульсных сигналов, в которых хорошо выражены два пика спектральной плотности мощности на частотах 57 и примерно 110 Гц. Потери на распространение для частоты 57 Гц примерно равны –35 дБ. Напомним, что гидрофон P_0 удален от пневмоизлучателя на расстояние 18 м.

Для моделирования сначала по опорному акустическому импульсу, измеренному гидрофоном P_0 и показанному на рис. 11а, с помощью МПУ построим эквивалентную точечную функцию источника S по методике, представленной в работе [19]. На рис. 11а видно, что измеренная амплитуда $p(t)$ примерно в 10 раз меньше, чем в эквивалентном точечном источнике S . Их спектры различаются примерно на 25 дБ, следовательно, экспериментальные потери при распространении энергии данного акустического импульса из моря от точки Т.3 до точки R.4 (расстояние 533 м, высота над уровнем моря 83 м) составляют –60 дБ.

Моделирование проведено с помощью МПУ в приближении пяти невзаимодействующих мод и “жидкого” дна, его результаты представлены на рис. 11б в виде графиков вариаций акустического давления $p(t)$ и их спектров $G(f)$. Рисунок 11б качественно иллюстрирует согласие результатов моделирования с натурными измерениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данной работы показывают, что акустические поля от различных источников могут устойчиво регистрироваться на поверхности суши и в скважинах на довольно значительном расстоянии от уреза воды. Используемый в работе аппаратный комплекс обеспечивает проведение оперативных натурных измерений, а программа для моделирования тональных и импульсных акустических полей в неоднородных 3-D трехслойных (воздух, вода, грунт) геоакустических волноводах, основанная на распространяющихся адиабатических или взаимодействующих нормальных модах в вертикальной плоскости и узкоугольном параболическом уравнении в горизонтальной плоскости, позволяет оценивать потери при распространении акустических сигналов. Получаемые таким путем данные необходимы для оценки возможного воздействия на биоту антропогенных акустических источников в воде и воздухе, таких как сейсмоакустические источники, вертолеты и суда на воздушной подушке.

На основании результатов натурных измерений, представленных в работе [4], и результатов исследований, приведенных в данной работе, можно рассмотреть возможность значительного удешевления организации и проведения в реальном времени акустического мониторинга сей-

сморазведочных работ на шельфе [1, 3]. В этом случае с помощью МПУ в модельном 3-D геоакустическом волноводе будет рассчитываться импульсное акустическое поле, формируемое в данной области шельфа сейсморазведочным сигналом. Эквивалентная точечная функция его источника может быть построена по методикам, представленным в работе [19], опирающимся на натурные измерения, проведенные в море или на берегу.

В заключении авторы выражают благодарность Д.Г. Ковзелью, С.В. Борисову, В.А. Гриценко и И.В. Медведеву за участие в натурных экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R.* Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. V. 134. P. 21–44.
2. *Рутенко А.Н., Гриценко В.А.* Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
3. *Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Boekholt M.* Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
4. *Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Ковзель Д.Г., Коротченко Р.А., Путов В.Ф., Соловьев А.А.* Мониторинг параметров сейсмоакустических импульсов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 2. С. 248–257.
5. *Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Путов В.Ф., Соловьев А.А., Манульчев Д.С.* Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 3. С. 348–362.
6. *Blackwell S.B., Lawson J.W., Williams M.T.* Tolerance by ringed seals (*Phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island // *J. Acoust. Soc. Am.* 115(5), Pt. 1. May 2004. P. 2346–2357.
7. *Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Оценки акустических шумов, генерируемых вспомогательными судами, работающими с нефтедобывающими платформами // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 5. С. 605–613.
8. *Petrov P.S., Trofimov M.Yu., Zakharenko A.D.* Mode parabolic equations for the modeling of three-dimensional sound propagation effects in shallow water // *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics*. 2–6 th July 2012, GB Edinburgh. P. 53–60.
9. *Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D.* A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // *Wave Motion*. 2015. V. 58. P. 42–52.

10. Рутенко А.Н. Натурные и модельные исследования распространения сейсмоакустических сигналов в 3-D геоакустических волноводах с сухопутным участком // Акустика океана. Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2016. С. 80–83.
11. Рутенко А.Н. Метод модового параболического уравнения для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе сейсморазведочным сигналом // Акустика океана. Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2018. С. 148–151.
12. Рутенко А.Н., Манульчев Д.С., Соловьев А.А. Исследование распространения энергии низкочастотных акустических и сейсмических волн на шельфе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 363–377.
13. Рутенко А.Н., Манульчев Д.С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акуст. журн. 2014. Т. 59. № 4. С. 384–394.
14. Рутенко А.Н., Козицкий С.Б., Манульчев Д.С. Влияние наклонного дна на распространение звука // Акуст. журн. 2015. Том. 61. № 1. С. 76–89.
15. Бородин А.Е., Долгих А.Г., Долгих Г.И., Фищенко В.К. Регистрация сейсмоакустических сигналов надводного судна двух-координатным лазерным деформографом // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 1. С. 59–69.
16. Борисов С.В., Грищенко А.В., Ковзель Д.Г., Лихачев В.В., Коротченко Р.А., Круглов В.М., Пенкин С.И., Рутенко А.Н. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натурных экспериментах // Вестник ДВО РАН. 2003. № 2. С. 16–29.
17. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU 2447658C2. Российская федерация / Гореликов А.И. – 2010126403/13; заявлено 28.06.2010; опубликовано 20.04.2012.
18. Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н. Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 102–106.
19. Манульчев Д.С. Построение функции источника для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе излучающим комплексом сейсморазведочного судна // Акустика океана. Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2016. С. 72–75.