

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ МЫС ШУЛЬЦА

© 2014 г. А. Н. Рутенко, Д. С. Манульчев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 29.11.2013 г.

Приведены результаты натурных и численных исследований особенностей распространения низкочастотных импульсных и тональных сейсмоакустических сигналов на трассах, пересекающих м. Шульца. Измерения были проведены с помощью цифровых радиогидроакустических буев, импульсного пневмоизлучателя, свешиваемого с борта катера и резонансного сейсмоизлучателя электромагнитного типа, установленного на берегу в б. Витязь Японского моря.

Ключевые слова: неоднородный геоакустический волновод, акустические и сейсмические волны на шельфе, моделирование распространения звука на шельфе.

DOI: 10.7868/S0320791914040170

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что во время проведения в море сейсморазведочных исследований [1–3] или строительных работ [4, 5], сопровождаемых забиванием фундаментных свай [6], генерируются сейсмоакустические сигналы, распространяющиеся в виде волн разного типа, формирующих на шельфе антропогенные акустические сигналы, которые могут оказать воздействие на морских животных [7, 8]. Следовательно, производственная деятельность людей на шельфе, а также результаты теоретических и экспериментальных работ [9, 10], обосновывают актуальность изучения особенностей и потерь при распространении низкочастотных волн, генерируемых не только в море, но и на берегу. Кроме того, особый интерес представляет распространение их через сухопутные участки – мыс или полуостров, отделяющие бухты и заливы от морского шельфа. В работе [10] представлены результаты исследований распространения низкочастотных акустических и сейсмических волн на шельфе Японского моря в районе п-ва Гамова. Натурные измерения были проведены с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы “Моллюск-07” [10], заякоренного цифрового радиогидроакустического буя (ЦРБ) [12], низкочастотного резонансного излучателя электромагнитного типа [11] и импульсного пневмоизлучателя [13], свешиваемых с борта судна, и резонансного сейсмоизлучателя [14], установленного на берегу. В этих экспериментах “Моллюск-07” и ЦРБ устанавливались в б. Витязь, а низкочастотные тональные сигналы генерировались на берегу или в море, причем некоторые трассы их распростране-

ния имели сухопутные участки, например, пересекали м. Шульца, отделяющий б. Витязь от Японского моря.

На берегу измерения проводились с помощью гидрофона, установленного в пластиковой 5-литровой бутылки с водой, закопанной в песок, и геофона типа А0515, обеспечивающего измерение вертикальной компоненты ускорения в частотном диапазоне 0.1–100 Гц. Спектральный анализ результатов этих измерений показал отношения сигнал/шум, достаточные для построения корректных оценок, которые использовались при численном моделировании с помощью программы RAMS [16]. В модельных геоакустических волноводах при задании скорости распространения продольных волн в дне мы ориентировались на экспериментальное значение скорости распространения низкочастотного акустического импульса через мыс, ограничивающий б. Витязь с севера. В результате было получено хорошее согласие модельных данных с результатами измерений.

В данной работе приводятся результаты анализа натурных и численных экспериментов, проведенных в том же районе шельфа Японского моря, но с применением модернизированного импульсного излучателя [13], сейсмоизлучателя [14] и трех ЦРБ. В этих экспериментах решались следующие задачи – оценка влияния сухопутного участка на потери при распространении сейсмоакустических сигналов, получение экспериментальных оценок скорости распространения низкочастотных акустических импульсов, через м. Шульца, проверка принципа взаимности между приемом и излучением на акустической трассе,

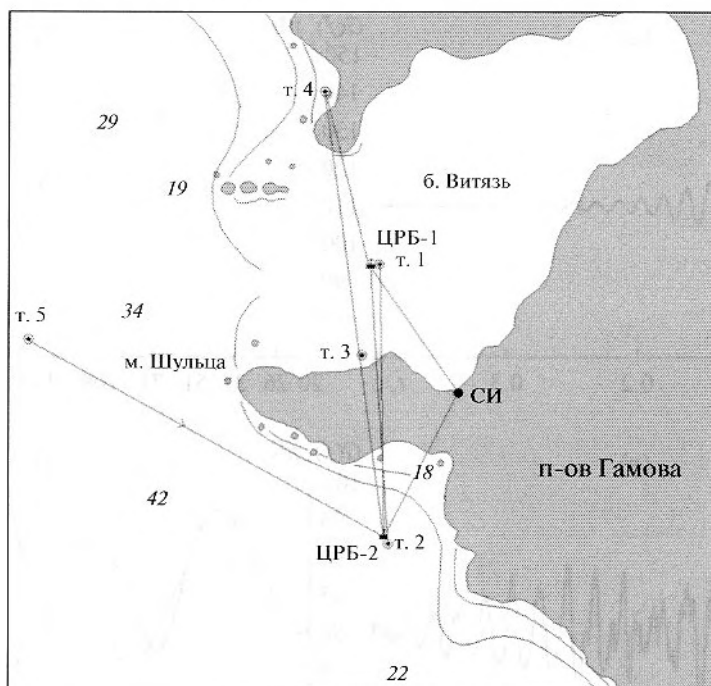


Рис. 1. Карта района исследований с указанием точек излучения и приема низкочастотных и сейсмоакустических сигналов.

пересекающей м. Шульца, адекватность численного моделирования натурным измерениям.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Стационарные измерения вариаций акустического давления у дна (≈ 25 см) проводились в частотном диапазоне 2–2000 Гц с помощью гидрофонов типа Ги-50 двух ЦРБ [11, 12]. Акустический низкочастотный импульсный сигнал генерировался пневмоизлучателем [13], свешиваемым с борта дрейфующего катера, а тональные сигналы генерировались сейсмоизлучателем [14], установленным на берегу в б. Витязь. На рис. 1 приведена карта района с указанием шести точек излучения: СИ, т. 1–т. 5 и двух точек приема: ЦРБ-1 и ЦРБ-2.

Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона ЦРБ, опускаемого с борта катера на глубину 10 м на удалении ≈ 18 м от пневмоизлучателя. Цифровые радиотелеметрические каналы от двух ЦРБ, установленных в море, и одного ЦРБ, расположенного на излучающем катере, принимались на береговом посту и обеспечили синхронный ввод в ЭВМ [15] измеряемых акустических сигналов, их визуализацию и последующий спектральный и взаимный корреляционный анализ. Это позволило оценить относительные потери и скорости распространения низкочастотных сигналов в сложных неоднородных геоакустических волноводах с сухопутными

участками. В табл. 1 приведены протяженности трасс распространения.

Для исследования потерь при распространении в море низкочастотных (24–30 Гц) колебаний, генерируемых на суше, в ТОИ ДВО РАН был разработан и изготовлен специальный резонансный излучатель электромагнитного типа [14]. В обсуждаемом эксперименте сейсмоизлучатель (СИ) был установлен на песчаном берегу б. Витязь вблизи уреза воды (рис. 1). Акустические измерения проводились с помощью гидрофонов, прошедших метрологическую поверку, и откалиброванных цифровых измерительно-регистрационных средств. На рисунках приводятся графики

Таблица 1. Название геоакустических трасс и их параметры

Название трассы распространения	Общая протяженность, в метрах	Протяженность сухопутного участка в метрах
СИ – ЦРБ-1	1040	
СИ – ЦРБ-2	1080	450
т. 1 – ЦРБ-2	1830	590
т. 2 – ЦРБ-1	1870	590
т. 3 – ЦРБ-2	1240	560
т. 4 – ЦРБ-1	1210	307
т. 4 – ЦРБ-2	3020	820
т. 5 – ЦРБ-2	2700	

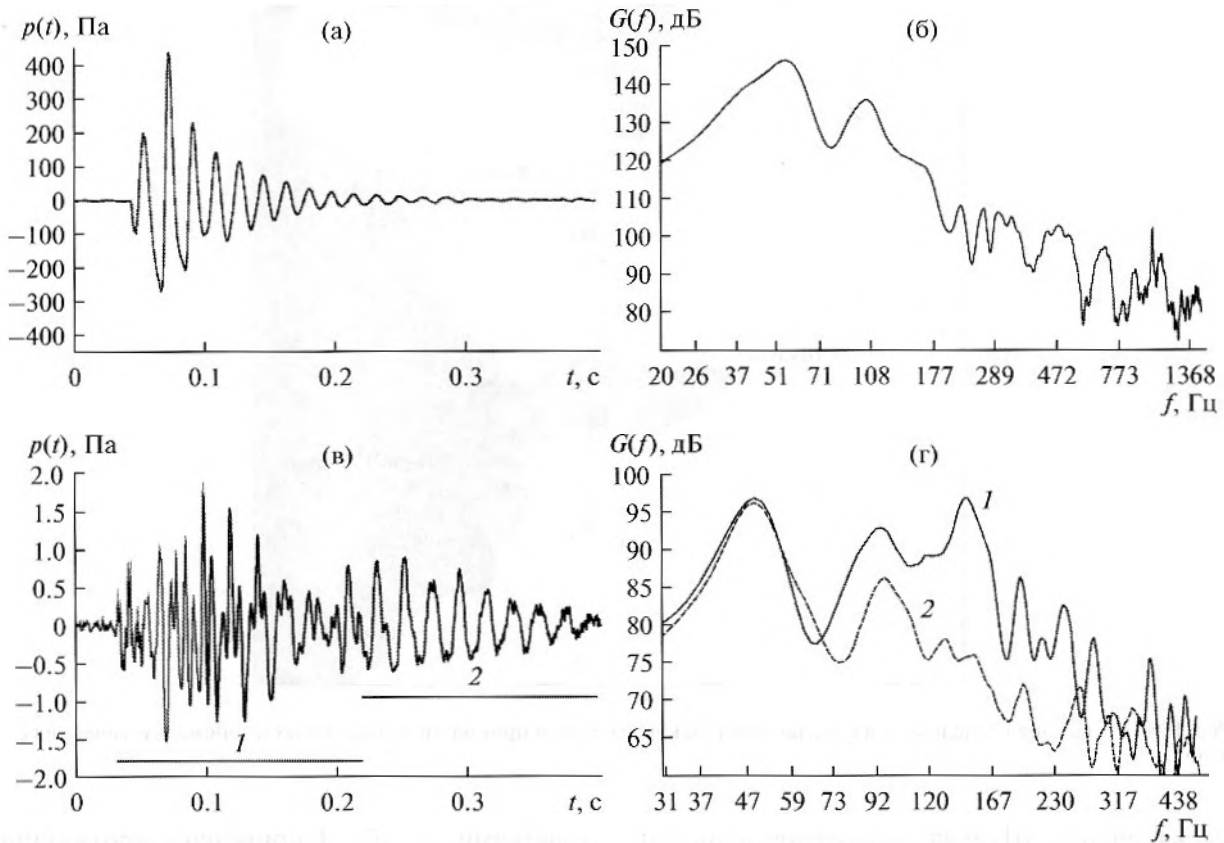


Рис. 2. Акустические импульсы и их спектры, измеренные: на расстоянии ≈ 18 м от пневмоизлучателя, расположенного на горизонте 8 м в т. 5 (а), (б); на расстоянии 2700 м, измеренного с помощью ЦРБ-2, (в), (г). Спектры акустических сигналов соответствующие временным интервалам 1 и 2 (г).

вариаций акустического давления $p(t)$ в паскалях, а графики спектров $G(f)$ — в децибелах относительно $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$. При оценке спектра измеренного акустического импульса применялось сглаживание по девяти частотам. Таким образом, все оценки спектров импульсных сигналов, представленные в этой статье, имеют 18 степеней свободы. Соответственно, для доверительной вероятности 90% истинное значение спектральной плотности находится в интервале от -2 до $+3$ дБ [17].

Для генерирования низкочастотных акустических импульсов применялся пневмоизлучатель [13]. Рассмотрим возможности применения данного пневмоизлучателя для исследований особенностей распространения низкочастотных сигналов на шельфе. На рис. 2 представлены акустические сигналы и их спектры, которые были измерены на дистанции ≈ 18 м с помощью опорного гидрофона и у дна на расстоянии 2700 м гидрофоном ЦРБ-2. Данный импульс был излучен в т. 5 на горизонте 8 м. Из рис. 1 видно, что акустическая трасса т. 5—ЦРБ-2, проходящая вдоль южного обрывистого скалистого берега м. Шульца на расстоянии 300 м, практически имеет постоянную глубину 32 м.

Как следует из рис. 2а, 2б, длительность генерируемого акустического импульса составляет ≈ 0.2 с, а его амплитуда достигала 430 Па. В его спектре $G(f)$ хорошо выражены два пика на частотах ≈ 52 и ≈ 108 Гц. Значения спектральной плотности начинают резко уменьшаться на частотах больше 170 Гц. Принятый акустический сигнал можно представить в виде двух импульсов, соответствующих временным интервалам, показанным на рис. 2в. На рис. 2г приведены графики $G(f)$, соответствующие вариациям $p(t)$, измеренным на этих интервалах.

Из рис. 2в видно, что энергия высокочастотных колебаний хорошо выражена на первом интервале. На графиках $G(f)$ (кривая 1) значения главных максимумов спектральной плотности на частотах 52 и 160 Гц примерно равны (рис. 2г). На зависимости $G(f)$ (кривая 2) пик на частоте 160 Гц отсутствует, однако он еще заметен на частоте 108 Гц, но по сравнению с кривой 1 значение $G(f)$ на этой частоте уменьшилось на 5 дБ. Практически не изменилось значение $G(f)$ на частоте 52 Гц, что, по-видимому, связано с отражениями от обрывистого южного берега м. Шульца (рис. 1).

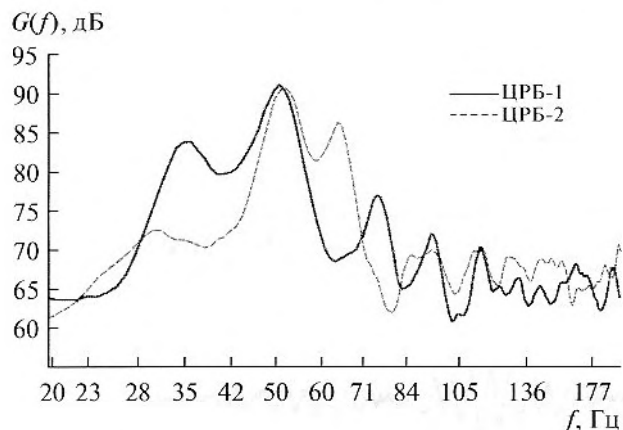


Рис. 3. Спектры импульсных акустических сигналов, излученных на глубине 8 м и распространявшихся вдоль акустических трасс т. 1—ЦРБ-2 и т. 2—ЦРБ-1.

Данная береговая линия характеризуется обрывистым скалистым берегом до глубины 22–25 м, а затем простирается наклонное песчаное дно, и на расстоянии 200 м от берега глубина достигает 30 м. Наверное, пространственные неоднородности скалистого берега под водой более эффективно отражают звук с частотой 52 Гц (длина волны $\lambda \approx 27$ м) и рассеивают энергию звука с частотой 160 Гц ($\lambda \approx 9$ м).

На основании результатов работы [10] и выполненных измерений (рис. 2) можно констатировать, что данная модификация пневмоизлучателя [13] в сочетании с цифровыми радиогидроакустическими буйами позволяет провести исследование распространения низкочастотных акустических сигналов в неоднородных геоакустических волноводах с сухопутными участками. Для численных расчетов распространения тональных сигналов мы использовали адаптированную программу RAMS [16], основанную на решении широкоугольных параболических уравнений, полученных из стационарных уравнений Ламе в цилиндрических координатах. Эта программа позволяет учитывать упругие свойства пород дна. При решении уравнений использовался метод конечных разностей в форме, известной как split-step Pade [16] на равномерной сетке с шагами dz и dr .

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИМПУЛЬСНЫМИ СИГНАЛАМИ

На рис. 1 показаны две реверсивные геоакустические трассы, т. 1—ЦРБ-2 и т. 2—ЦРБ-1, пересекающие м. Шульца. Протяженность сухопутного участка 590 м. На рис. 3 приведены зависимости спектров акустических импульсов, излученных на горизонте 8 м и принятых гидрофонами соответствующих ЦРБ. Видно, что спектры $G(f)$ на частотах 45–60 Гц имеют хорошо выраженный пик,

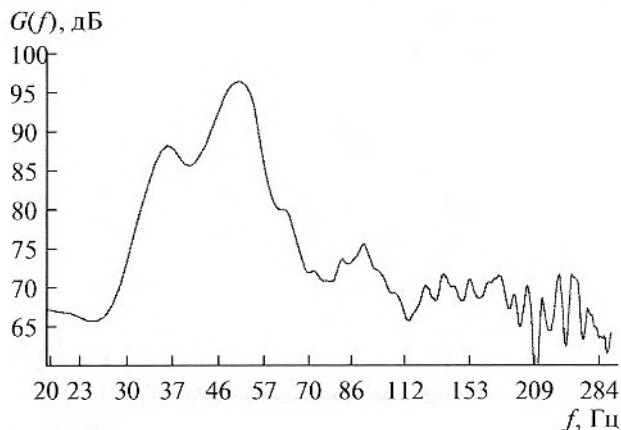


Рис. 4. Спектр импульсного акустического сигнала, распространявшегося вдоль трассы т. 3—ЦРБ-2.

причем их значения на частоте ≈ 52 Гц равны. На графике, соответствующем приему в точке ЦРБ-1, отсутствует пик на частотах 60–70 Гц, который хорошо выражен в спектре сигнала, принятом ЦРБ-2, но у него есть ярко выраженный пик на частоте ≈ 36 Гц, которого нет в сигнале ЦРБ-2. Таким образом, при инвариантности на частоте 52 Гц мы наблюдаем разногласие на более низких и более высоких частотах.

На рис. 4 в спектре $G(f)$, соответствующем излучению в б. Витязь у берега в точке с глубиной моря 10 м (т. 3, рис. 1), заметен пик на частоте ≈ 54 Гц.

На рис. 5 показаны вариации акустического давления $p(t)$, измеренные опорным гидрофоном в т. 3 (рис. 5а) и на удалении 1240 м гидрофоном ЦРБ-2 (рис. 5б), где хорошо выражены колебания на временном интервале продолжительностью 0.5 с. Время распространения акустического импульса от опорного гидрофона до гидрофона ЦРБ-1 или ЦРБ-2 определялось с помощью модуля значений взаимной нормированной корреляционной функции $|B_{\text{Опора;Analyse}}(\tau)|$,

$$B_{\text{Опора;Analyse}}(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^{T_{\text{Analyse}}} (p_t^{\text{Опора}} \times p_{t+\tau}^{\text{DRB}})}{\sqrt{\sum_{t=0}^{T_{\text{Analyse}}} (p_t^{\text{Опора}})^2 \sum_{t=0}^{T_{\text{Analyse}}} (p_{t+\tau}^{\text{DRB}})^2}},$$

где $p^{\text{Опора}}$, p^{DRB} — значения звукового давления, измеренные опорным гидрофоном вблизи пневмоизлучателя и гидрофоном ЦРБ-1 или ЦРБ-2 в точке приема, T_{Analyse} — временной интервал опорного и принятого сигналов. Результат взаимного корреляционного анализа или согласованной фильтрации показан на рис. 5в в виде расчетных значений $|B_{\text{Опора;Опора}}(\tau)|$ и $|B_{\text{Опора;Analyse}}(\tau)|$, в том числе, после сглаживания на временном интервале

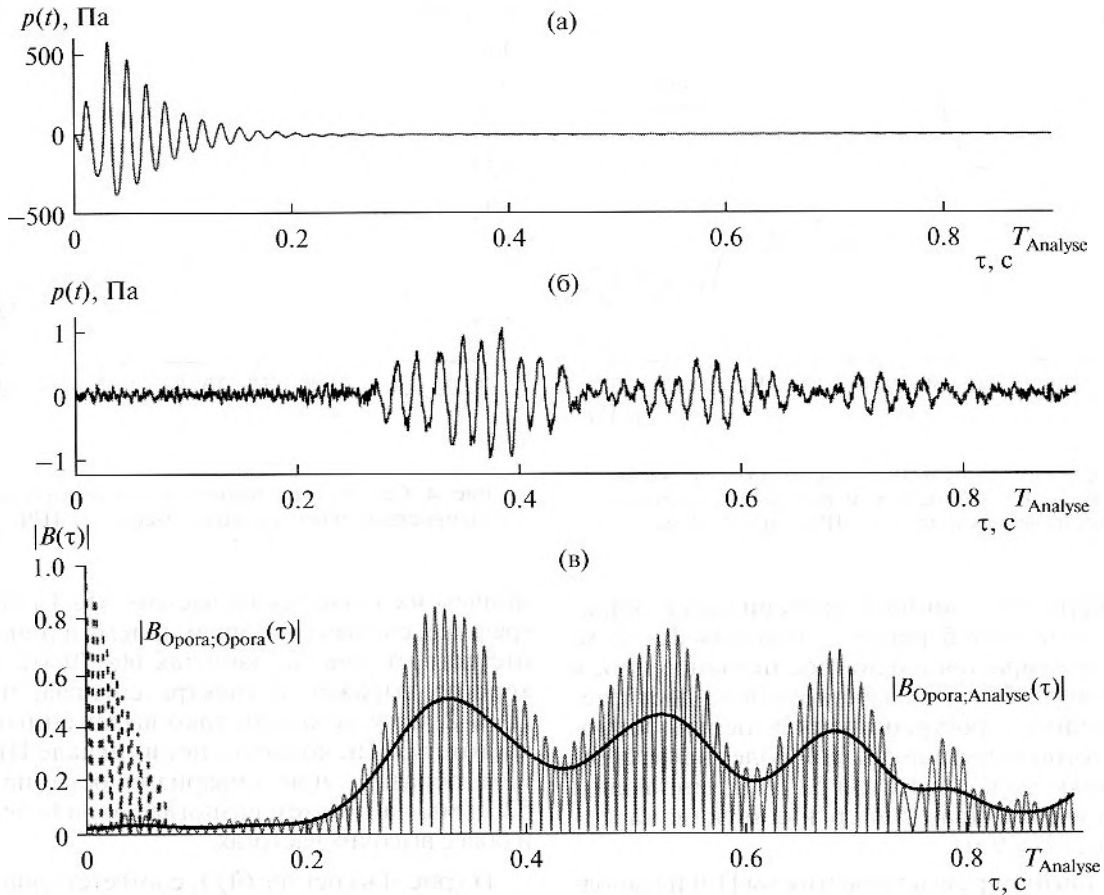


Рис. 5. Вариации акустического давления $p(t)$, измеренные с помощью опорного гидрофона при излучении импульса в т. 3 (а); измеренные гидрофоном ЦРБ-2 (б); модуль нормированной автокорреляционной функции $|B_{\text{Опора;Опора}}(\tau)|$ и взаимной корреляционной функции $|B_{\text{Опора;Analyse}}(\tau)|$ на акустической трассе т. 3—ЦРБ-2 (в).

36 мс. Зависимость $|B_{\text{Опора;Analyse}}(\tau)|$ позволяет оценить скорость распространения геоакустического сигнала в приближении данных GPS для точки постановки ЦРБ-2 и положения опорного гидрофона. Следовательно, на акустической трассе т. 3—ЦРБ-2, пересекающей мыс Шульца (рис. 1), максимальному значению $|B_{\text{Опора;Analyse}}(\tau)| \approx 0.5$ соответствует скорость распространения $C_1 = 3690$ м/с. Второму пику соответствует скорость распространения $C_2 = 2331$ м/с, а третьему пику — $C_3 = 1794$ м/с. Если предположить, что данные колебания распространялись на водном участке трассы (660 м) со скоростью 1452 м/с, тогда на сухопутном участке через м. Шульца (560 м) она распространялась со скоростью 2465 м/с.

Таким образом, корреляционный анализ показывает две основные скорости распространения низкочастотных сигналов, генерируемых возле южного пологого берега м. Шульца, равные ≈ 2400 и 3700 м/с. По-видимому, эти два значения скорости распространения сигналов соответствуют

двум путям разной протяженности или волнам разного типа, распространяющимся в грунте.

Согласно [10], при анализе скорости распространения акустического импульса через мыс,

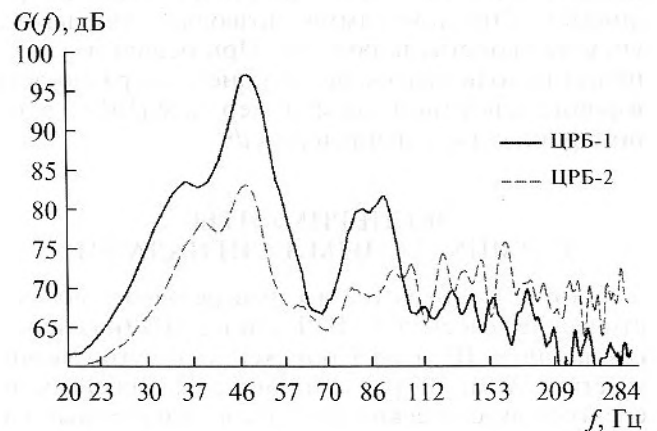


Рис. 6. Спектры импульсных акустических сигналов, излученных в т. 4 и принятых в точках расположения ЦРБ-1 и ЦРБ-2.

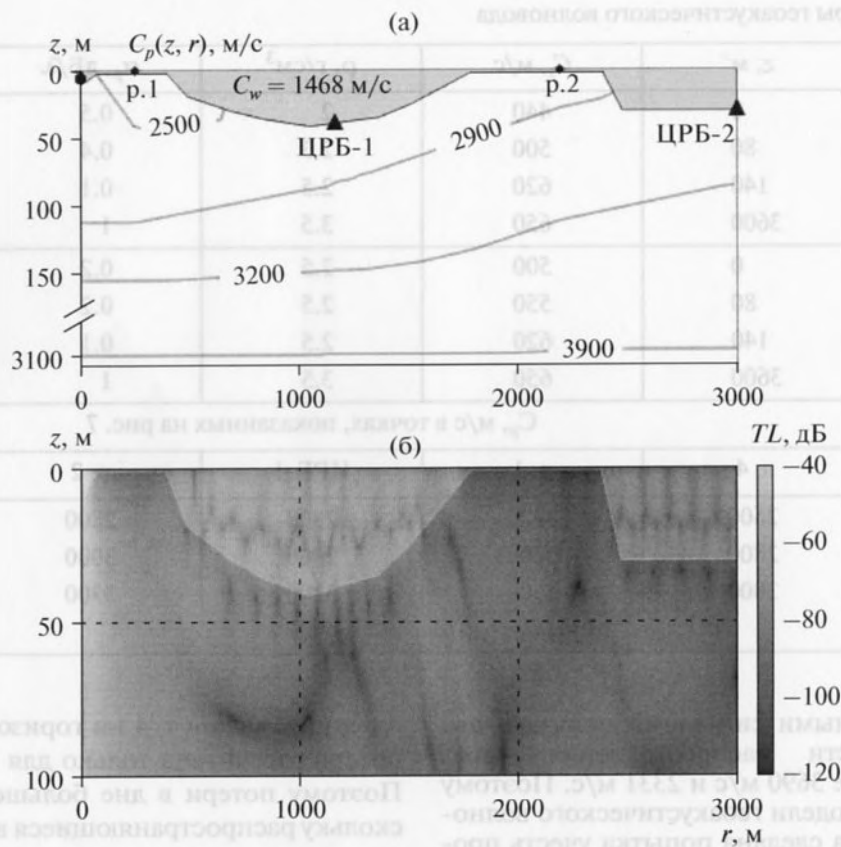


Рис. 7. Параметры модельного геоакустического волновода, соответствующего акустической трассе т. 4—ЦРБ-2 (а) и распределение в нем потерь $TL(z, r, f = 52 \text{ Гц})$, рассчитанное для продольных волн (б).

ограничивающий б. Витязь с севера, что примерно вдоль трассы т. 4—ЦРБ-1, мы получили для сухопутного участка скорость распространения $\approx 2200 \text{ м/с}$. Следует отметить, что по сравнению с м. Шульца (рис. 1) северный мыс относительно низкий, с разрушенными скальными породами.

Особый интерес представляют спектры акустических импульсов, показанные на рис. 6, которые соответствуют излучению в т. 4 (глубина моря 10 м). На геоакустической трассе т. 4—ЦРБ-1 есть сухопутный участок протяженностью 307 м, а на трассе т. 4—ЦРБ-2 два сухопутных участка общей протяженностью 820 м (рис. 1). Зависимости $G(f)$ позволяют оценить относительные потери $TL(f)$, которые могут быть использованы при построении модельного геоакустического волновода т. 4—ЦРБ-2, поскольку точка приема ЦРБ-1 близка к линии, соединяющей эти точки. Как следует из рис. 6, относительные потери при распространении акустического импульса, излученного на горизонте 5 м в точке т. 4 в направлении от ЦРБ-1 до ЦРБ-2, на частоте 52 Гц основного пика, составляют $\approx -15 \text{ дБ}$.

На рис. 7а показан модельный геоакустический волновод, примерно соответствующий трассе распространения акустического импульса, из-

лученного на горизонте 5 м в т. 4. Поскольку в программе RAMS нельзя разрывать водный слой, то в модельном геоакустическом волноводе на сухопутных участках толщина водного слоя равна 0.8 м, и, соответственно, он практически не влияет на распространение продольных и поперечных волн с частотой 30–150 Гц. Расчеты были проведены для тонального сигнала частоты 52 Гц. На этой частоте в спектрах акустических импульсов, измеренных в точках ЦРБ-1 и ЦРБ-2 (рис. 6), ярко выражены пики, значительно превышающие фон, поэтому оценка относительных потерь -15 дБ имеет высокую достоверность. Опираясь на численные результаты взаимного корреляционного анализа, было подобрано пространственное распределение акустических параметров пород, слагающих дно и сухопутные участки. Для них на частоте 52 Гц получено значение относительных потерь -17 дБ между точками ЦРБ-1 и ЦРБ-2, что близко к экспериментальному -15 дБ .

В работе [10] при согласованном с экспериментальными данными численном моделировании для модельного геоакустического волновода, пересекающего м. Шульца вдоль линии СИ—ЦРБ-2 (рис. 1), получено на сухопутном участке значение $C_p \approx 2500 \text{ м/с}$. Выше было показано, что экспери-

Таблица 2. Параметры геоакустического волновода

Точки	z , м	C_s , м/с	ρ , г/см ³	α_p , дБ/λ	α_s , дБ/λ
т. 4, ЦРБ-1	0	440	2	0.5	0.2
	80	500	2.3	0.4	0.2
	140	620	2.5	0.1	0.2
	3600	650	3.5	1	1
ЦРБ-2	0	500	2.5	0.2	0.2
	80	550	2.5	0.2	0.2
	140	620	2.5	0.1	0.2
	3600	650	3.5	1	1
z , м	C_p , м/с в точках, показанных на рис. 7				
	т. 4	р. 1	ЦРБ-1	р. 2	ЦРБ-2
0	2600	3000	2800	2800	3000
85	2800	3200	2900	3000	3200
140	3000	3300	3100	3300	3300
3600			4000		

менты с импульсными сигналами показали два значения скорости распространения через м. Шульца, равные 3690 м/с и 2331 м/с. Поэтому при построении модели геоакустического волновода (табл. 2) была сделана попытка учесть пространственные (по z и по r) изменения акустических параметров пород, слагающих дно и сухопутные участки [10]. Конечно, модельные значения могут значительно отличаться от реальных. Тем не менее, построенные численные модели позволяют расширить результаты натурных измерений на другие частоты, на близлежащие акустические трассы и на другие гидрологические условия, например, зимние.

На рис. 76 показано распределение функции потерь $TL(z, r, f = 52 \text{ Гц})$ для звука частотой 52 Гц,

генерируемого в т. 4 на горизонте 5 м. Функция потерь рассчитана только для продольных волн. Поэтому потери в дне больше, чем в воде, поскольку распространяющиеся в дне поперечные и поверхностные волны трансформируются в продольные при переходе в водный слой, в котором полагается $C_p = C_w = 1468 \text{ м/с}$. Распределение значения скорости распространения продольных волн C_p в дне показано кривыми одинаковой величины. В табл. 2 приведены значения скорости распространения поперечных волн C_s , плотности ρ и коэффициентов поглощения для продольных α_p и поперечных α_s волн в дне на заданных горизонтах модельного геоакустического волновода.

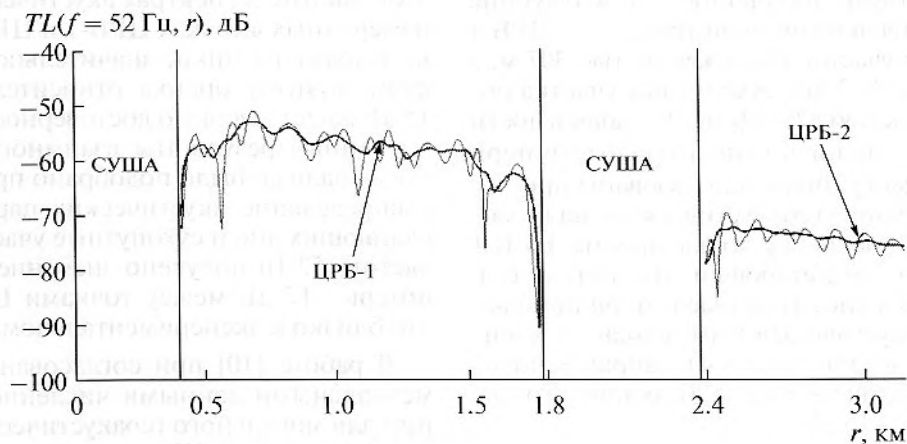


Рис. 8. Потери в водном слое на расстоянии 1 м над дном, до и после усреднения для акустического сигнала, генерируемого частотой 52 Гц в т. 4.

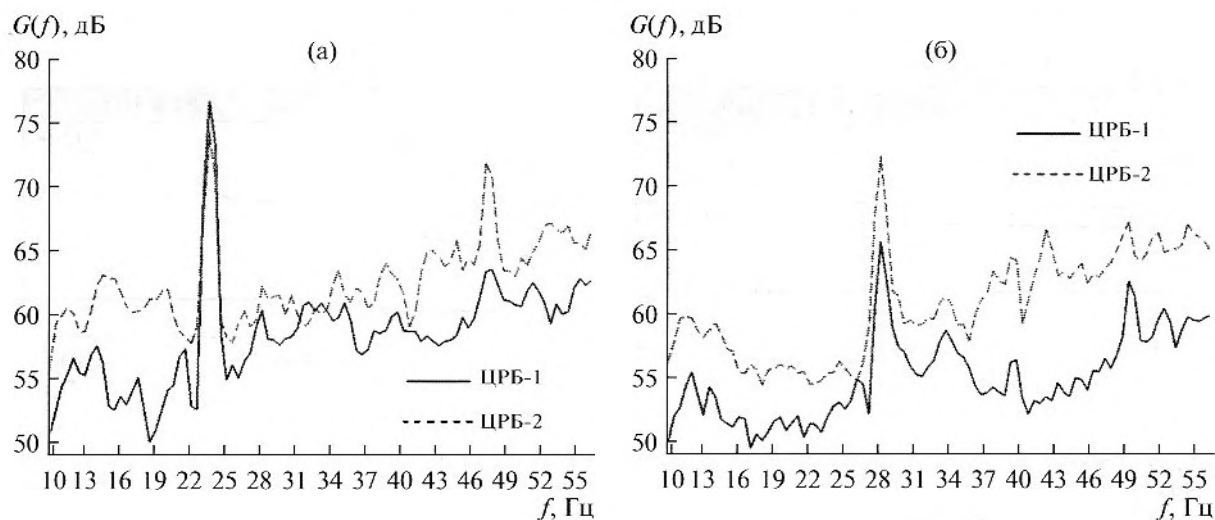


Рис. 9. Спектры синхронно измеренных акустических сигналов во время работы СИ на частоте 24 Гц (а) и 29 Гц (б).

На рис. 8 показаны модельные значения функции потерь, рассчитанные в водном слое для звука, генерируемого в т. 4 на горизонте 5 м на частоте 52 Гц. Для устранения пространственной интерференции результаты моделирования усреднялись по глубине на интервале 1–4 м от дна (тонкая линия), а затем сглаживались скользящим средним по горизонтали на масштабе 25 м (толстая линия). Расчеты показали, что при синхронных изменениях в пяти характерных точках модельного геоакустического волновода т. 4—ЦРБ-2 (табл. 2) на горизонте $z = 85$ м, вариации значений C_p на ± 100 м/с приводят к искажениям лишь интерференционной картины, а вариации C_p на ± 200 м/с — к изменениям усредненных значений $TL(f = 52 \text{ Гц}, r)$ до 5 дБ. Согласно рис. 8, после сглаживания по z и r относительные потери между точками ЦРБ-1 и ЦРБ-2 составили -17 дБ, что примерно соответствует экспериментальному значению -15 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 показаны трассы с указанием точки излучения сейсмоакустических волн СИ и двух точек, в которых с помощью гидрофонов ЦРБ проводились измерения акустического давления на высоте 25 см над дном. Из табл. 1 видно, что расстояние от СИ до точек приема ЦРБ-1 и ЦРБ-2 были равны ≈ 1060 м. Однако на трассе СИ—ЦРБ-1 водный слой начинался практически от точки излучения до точки приема, в которой его толщина достигла 38 м, тогда как трасса СИ—ЦРБ-2 имела в начале сухопутный участок протяженностью 450 м.

Поскольку толщина водного слоя вдоль трассы распространения от СИ до ЦРБ-1 увеличива-

лась от 0 до 38 м, то колебания частотой 29 Гц могли возбудить в водном слое водную моду только вблизи точки приема, и это же можно сказать о точке приема ЦРБ-2. Известно, что потери распространения для сейсмических волн увеличиваются с ростом частоты сигнала. Тем не менее, из рис. 9 видно, что уровни акустических сигналов, синхронно измеренных в точках расположения ЦРБ-1 и ЦРБ-2 на частоте 24 Гц, примерно одинаковы, а на частоте 29 Гц их уровни различаются на ≈ 7 дБ. По-видимому, это связано с особенностями распространения низкочастотных сигналов в грунте при наличии водного слоя и ее переходом в него. Отметим, что южный берег м. Шульца и п-ва Гамова скалистый и обрывистый, а северо-восточный берег относительно пологий, и в точке установки СИ вдоль уреза воды наблюдается слой песка, уходящего по наклонному дну в море.

При построении модельных геоакустических волноводов, соответствующих сейсмоакустическим трассам, на которых были проведены натурные измерения, мы использовали батиметрические измерения, проведенные с помощью эхолота и GPS, а при построении распределения геоакустических параметров пород, слагающих дно и сухопутный участок трассы, — результаты измерений скорости распространения низкочастотных акустических импульсов, которые были представлены выше. Для моделирования распространения сейсмоакустических волн вдоль акустических трасс СИ—ЦРБ-1 и СИ—ЦРБ-2, проводимых с помощью программы RAMS [16], нами были введены градиенты изменения скорости распространения продольных волн в дне, т.е. зависимости $C_p(z, r)$ от координаты z и расстояния r . Из рис. 10а видно, что в модельных волноводах водный слой однородный, $C_p \equiv C_w = 1468$ м/с, а

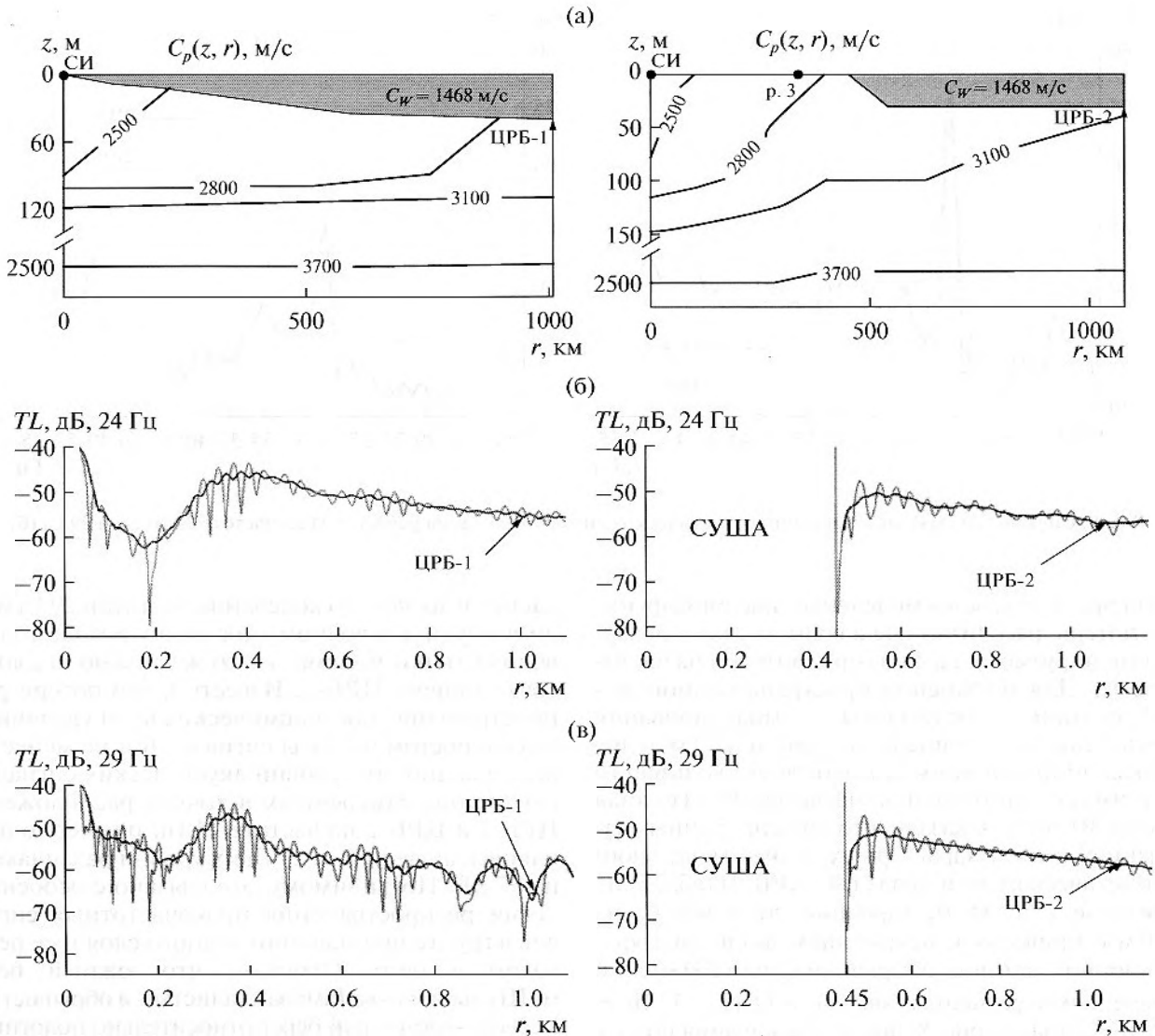


Рис. 10. Модельные геоакустические волноводы СИ–ЦРБ-1 слева и СИ–ЦРБ-2 справа (а); потери в водном слое на расстоянии 1 м над дном, до и после усреднения сейсмического сигнала, генерируемого частотой 24 Гц (б) и 29 Гц (в).

распределение значений $C_p(z, r)$ в дне показано с линиями равной величины. Модельные значения основных геоакустических параметров в дне приведены в табл. 3.

На рис. 10б, 10в показаны модельные значения функции потерь $TL(r)$ в водном слое на расстоянии 1 м от дна, соответствующие акустическим полям, формируемым в геоакустических волноводах (рис. 10а) при работе точечного источника на берегу с частотой 24 и 29 Гц. Как следует из рис. 9, 10б, 10в, относительные потери между точками измерения ЦРБ-1 и ЦРБ-2 для тонального сигнала частотой 24 Гц в натурном и численном экспериментах составили 2 и 1 дБ, а для сигнала с частотой 29 Гц — 5 и –7 дБ соответственно.

Данная работа иллюстрирует возможности согласования численного моделирования с результатами натуральных измерений для акустических полей, формируемых в сложных геоакустических условиях, характерных для шельфовых зон с неоднородной береговой линией, с выступающими скалистыми мысами и относительно глубокими бухтами. Опираясь на визуальные наблюдения пород сухопутных участков и результаты измерений скорости распространения низкочастотных импульсов, в приближении широкоугольных параболических уравнений для водного слоя и неоднородного дна можно построить численные модели, расширяющие результаты натурных измерений на другие частоты и гидрологические условия.

Таблица 3. Параметры геоакустических волноводов

Трассы распространения	Точки	z, м	C_s , м/с	ρ , г/см ³	α_p , дБ/λ	α_s , дБ/λ
СИ–ЦРБ-1	СИ, ЦРБ-1	0	440	2	0.5	0.2
		80	500	2.3	0.4	0.2
		140	620	2.5	0.1	0.2
		3600	650	3.5	1	1
СИ–ЦРБ-2	СИ	0	440	2	0.5	0.2
		80	500	2.3	0.4	0.2
		140	620	2.5	0.1	0.2
		3600	650	3.5	1	1
	р. 3 (см. рис. 10а)	0	440	2.5	0.3	0.2
		80	500	2.5	0.2	0.2
		140	620	2.5	0.1	0.2
		3600	650	3.5	1	1
	ЦРБ-2	0	500	2.5	0.2	0.2
		80	550	2.5	0.2	0.2
		140	620	2.5	0.1	0.2
		3600	650	3.5	1	1
z, м	C_p , м/с в точках, показанных на рис. 10а					
	СИ	ЦРБ-1	р. 3	ЦРБ-2		
	0	2400	2800	2800	3000	
	85	2500	2900	3000	3200	
	140	3000	3100	3300	3300	
3600	4000					

Таким образом, разработанный измерительно-регистрационный комплекс и программное обеспечение позволяют проведение оперативных натурных измерений в заданном районе шельфа с последующим построением адекватных физических моделей. Это позволяет проводить оценки уровней антропогенных акустических полей, формируемых на шельфе со сложной береговой линией, если известно местоположение в море или на берегу источников сейсмоакустических шумов и их спектр.

Пространственные неоднородности береговой линии и акустических свойств пород, слагающих дно, и выступающие мысы требуют применения трехмерного моделирования акустических полей, формируемых индустриальным источником. Для этих целей предлагается использовать возможности численного трехмерного моделирования распространения акустических 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 водных и водно-донных мод [18, 19]. На

камнях в прибрежной 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. Данное направление численного моделирования, опирающееся на натурные эксперименты, при поддержке компанией “Эксон Нефтегаз Лимитед” активно развивается в ТОИ ДВО РАН [18–20].

В заключение авторы выражают благодарность С.В. Борисову, В.А. Гриценко, Д.Г. Ковзелью, А.А. Соловьеву и М.Ю. Фершалову за участие в экспериментальных работах и А.И. Гореликову за возможность применения в экспериментах пневмоизлучателя.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ (12-05-33022 мол_a_вед).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R.* Calibrating and monitoring the western gray whale mit-

- igation zone and estimating acoustic transmission during a 3D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. V. 134. P. 21–44.
2. 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.
 3. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Voekholt M. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсмо-разведочных импульсов // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
 4. Рутенко А.Н., Racca R. Организация и результаты акустического мониторинга во время постановки оснований нефтедобывающих платформ “Лунское” и “ПА-Б” на шельфе о. Сахалин / Акустика океана. Докл. XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 353–356.
 5. Рутенко А.Н., Гриценко В.А. Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
 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. 2004. V. 115. № 5. Pt. 1. P. 2346–2357.
 7. Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I., Thomson D.H. Marine mammals and noise. Academic Press Limited. 1995. 576 p.
 8. Racca R., Rutenko A., Bröker K, Gailey G. Model based sound level estimation and in-field adjustment for real-time mitigation of behavioural impacts from a seismic survey and post-event evaluation of sound exposure for individual whales / Proceedings of Acoustics 2012. Fremantle 21–23 November 2012. Australia. P. 1–3.
 9. Collins M.D., Coury R.A., Siegmann W.L. Beach acoustics // J. Acoust. Soc. Am. 1995. V. 97. № 5. Pt. 1. P. 2767–2769.
 10. 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.
 11. Борисов С.В., Гриценко А.В., Ковзель Д.Г. и др. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натуральных экспериментах // Вестн. ДВО РАН. 2003. № 2. С. 16–29.
 12. 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.
 13. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU 2447658 С2. РФ / Гореликов А.И. 2010126403/13, заявлено 28.06.2010, опубликовано 20.04.2012.
 14. Борисов С.В., Пенкин С.И., Рутенко А.Н. Резонансный излучатель для генерирования на берегу сейсмических волн и результаты его применения в прибрежных экспериментах / Сб. трудов научн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения А.В. Римского-Корсакова. М.: ГЕОС, 2010. С. 173–175.
 15. Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Коротченко Р.А. Измерительно-регистрационный комплекс для работы с аналоговыми и цифровыми акустическими системами / Акустика океана. Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. с. 271–273.
 16. Collins M.D. A split-step pade solution for the parabolic equation method // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 93. P. 1736–1742.
 17. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 2. М.: Мир, 1983. 256 с.
 18. Трофимов М.Ю. Широкоугольные модовые параболические уравнения // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 6. С. 274–278.
 19. 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 11-th European Conference on Underwater Acoustics. 2–6 th July 2012, GB Edinburgh. P. 53–60.
 20. Рутенко А.Н., Фершалов М.Ю. 2D и 3D моделирование акустических полей на шельфе со сложным пространственным рельефом дна / Акустика океана. Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 86–89.