

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ

© 2013 г. А. Н. Рутенко, Д. С. Манульчев, А. А. Соловьев

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

690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 27.09.2012 г.

Приводятся результаты натуральных и численных исследований особенностей распространения энергии низкочастотных акустических и сейсмических сигналов на шельфе Японского моря. Измерения были проведены с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы “Моллюск-07”, низкочастотного резонансного излучателя электромагнитного типа, импульсного пневмоизлучателя, свешиваемых с борта судна и резонансного сейсмоизлучателя, установленного на берегу.

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

DOI: 10.7868/S0320791913030118

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным освоением углеводородных месторождений, расположенных на континентальном шельфе, особую актуальность получили задачи предсказания уровней антропогенных шумов, которые может вызвать данная производственная деятельность людей в районах постоянного или сезонного проживания морских животных, использующих акустические сигналы. Возможности теоретических моделей для предсказания потерь при распространении звука вдоль профиля, простирающегося от “точки” будущего индустриального объекта до района обитания морских животных, на которых индустриальные шумы могут оказать воздействие, весьма ограничены. Это обусловлено сильным влиянием дна, особенно на низких частотах. Как правило, на моделируемом акустическом профиле неизвестно реальное распределение слагающих его пород, которые определяют его геоакустические свойства. Кроме того, известно, что при работе в водном слое низкочастотного источника звука в дне генерируются поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы между средами, если хотя бы в одной из них могут существовать сдвиговые волны. Например, в теоретической работе [1] показано, что в волноводе протяженностью 10 км со 100 м слоем воды и 5 м слоем песка, лежащем на коренных породах, звуковая энергия на частотах выше 50 Гц переносится продольными волнами в водном слое, а на частотах меньше 10 Гц – сейсмическими. Соответ-

ственно, в промежуточной частотной области потери при распространении больше на 40 дБ, чем на частотах меньше 10 Гц и больше 50 Гц. В работе [2] численно исследовалось влияние акустических свойств пород, формирующих шесть слоев среды, в верхнем водном слое которой генерировались низкочастотные колебания и показано, что введение вместо песчаного полупространства слоя песка и границы песок–известняк резко увеличивает значения амплитуд поля в придонной области. Эта добавка составляет на дистанции 20 км до 50 дБ на частоте 1 Гц и до 60 дБ на частоте 10 Гц.

Известно, что интенсивные антропогенные сигналы генерируются в море и на берегу во время проведения на шельфе сейсморазведочных работ [3–7], строительства подводных трубопроводов, установки газо-нефтедобывающих платформ и их обслуживания, а также во время забивания на берегу фундаментных свай [8].

Таким образом, практическая деятельность людей на шельфе и результаты теоретических исследований [1, 2] обосновывают актуальность изучения особенностей и потерь при распространении на шельфе энергии низкочастотных колебаний, генерируемых в море и на берегу.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

В данной работе обсуждаются результаты экспериментальных и теоретических исследований функции потерь – $TL(f, r)$ в частотном диапазоне 14–260 Гц, проведенных на шельфе Японского

моря со сложной скалистой береговой линией. Кроме того, специальные эксперименты были проведены в относительно глубоководной (36 м) бухте Витязь (Японское море).

Измерения проводились с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы “Моллюск-07” [9], цифрового радиобуя (ЦРБ) [10], низкочастотного излучателя электромагнитного типа [10] и импульсного пневмоизлучателя [11], свешиваемых на глубину 10 м с борта дрейфующего судна. Сейсмоакустические сигналы генерировались на берегу с помощью специального излучателя [12]. Батиметрические измерения проводились с помощью судового эхолота с GPS.

При решении практических задач, связанных с оценками $TL(f, r)$ в мелководных неоднородных акустических волноводах, характерных для шельфа, как правило, проводятся специальные натурные измерения на выбранных акустических профилях с использованием стационарных точек приема и квазистационарных точек излучения [13]. Могут также применяться буксируемые излучатели [14]. В результате анализа результатов измерений, проведенных в известных гидрологических условиях для данного акустического профиля, строится эмпирическая оценка функции $TL_{exp}(f, r)$. Затем с помощью ее сопоставления с теоретическими значениями $TL_{теор}(f, r)$, полученными, например, с помощью метода нормальных волн для некоторых наборов варьируемых параметров слоистого морского дна, достигается их наилучшее согласие и далее этот набор параметров используется в данном модельном геоакустическом волноводе. После этого с помощью численных экспериментов можно исследовать влияние на функцию $TL_{теор}(f, r)$ сезонных гидрологических изменений, поверхностного волнения, пространственных акустических неоднородностей, формируемых внутренними волнами и другими гидродинамическими процессами, характерными для шельфа, а главное – рассчитать оценки спектров антропогенных акустических шумов, которые может сформировать на данном акустическом профиле индустриальный источник с известным спектром генерируемых им шумов [13].

Экспериментальные значения функции потерь $TL(f, r)$ в дБ между точкой приема, в которой была установлена вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система или гидрофон ЦРБ, и одной из точек излучения – T_j , расположенной на расстоянии r от точки приема, определялись с помощью выражения $TL_{T_j}(f, r) = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N G(z_i, f, r)}{NG_{1m}(f)} \right)$. Здесь $G(z_i, f, r)$ – оценка

значения спектральной плотности мощности акустического сигнала, измеренного с помощью гидрофона “Моллюска-07”, находящегося на горизонте z_i на расстоянии r от точки излучения, N – число измерительных гидрофонов, а $G_{1m}(f)$ – оценка значения спектра излучаемого сигнала, измеренного с помощью опорного гидрофона, установленного на расстоянии одного метра от центра излучателя [10], свешенного на глубину 10 м с борта судна, дрейфующего или стоящего на якоре в точке T_j .

В этой работе мы ввели и определили новую величину – функцию потерь TL . По своему физическому смыслу она близка к известной в инженерной гидроакустике величине потери распространения. Так же, как и потери распространения, наша величина TL включает и ослабление звукового поля, связанное с геометрическим расширением фронта волны. Фактически величина TL отличается от потерь распространения только знаком.

При изучении зависимости значения функции потерь от z мы будем использовать выражение

$TL_{T_j}(z_i, f, r) = 10 \lg \left(\frac{G(z_i, f, r)}{G_{1m}(f)} \right)$, где $i = 1, \dots, 8$ соответствует номеру гидрофона “Моллюска-07”, находящегося на горизонте z_i . Для уменьшения влияния пространственной интерференции излучение тональных сигналов производилось с борта дрейфующего судна и оценки спектров синхронно измеренных сигналов получались в результате усреднения за 2–3 мин значений периодограмм, рассчитанных с помощью БПФ по 1-секундным реализациям.

Отметим, что в относительно мелководных и неоднородных волноводах функция потерь для низкочастотного звука зависит от поглощения [15], но в основном определяется физическими параметрами пород, слагающих дно, геометрическими характеристиками водного слоя и геоакустическими неоднородностями в дне.

Для исследований потерь при распространении в море энергии низкочастотных (24–30 Гц) колебаний, генерируемых на суше, в ТОИ ДВО РАН был разработан и изготовлен специальный резонансный излучатель сейсмических волн электромагнитного типа [12]. Для оценки звукового давления, возбуждаемого излучателем, во время экспериментов рядом с излучателем, на расстоянии 2 м от его центра, в пластиковую 5-литровую бутылку, закопанную в песок и заполненную водой, помещался опорный гидрофон (P_0). Сейсмоизлучатель (СИ) был установлен на песчаном берегу бухты Витязь вблизи уреза воды (см. рис. 1). В данном эксперименте он был настроен на резонансную частоту, равную ≈ 27 Гц. Измерения генерируемых им волн производились с помощью опорного гидрофона P_0 и гидрофона P_1 ЦРБ, установленного у дна на расстоянии 67 м от излу-

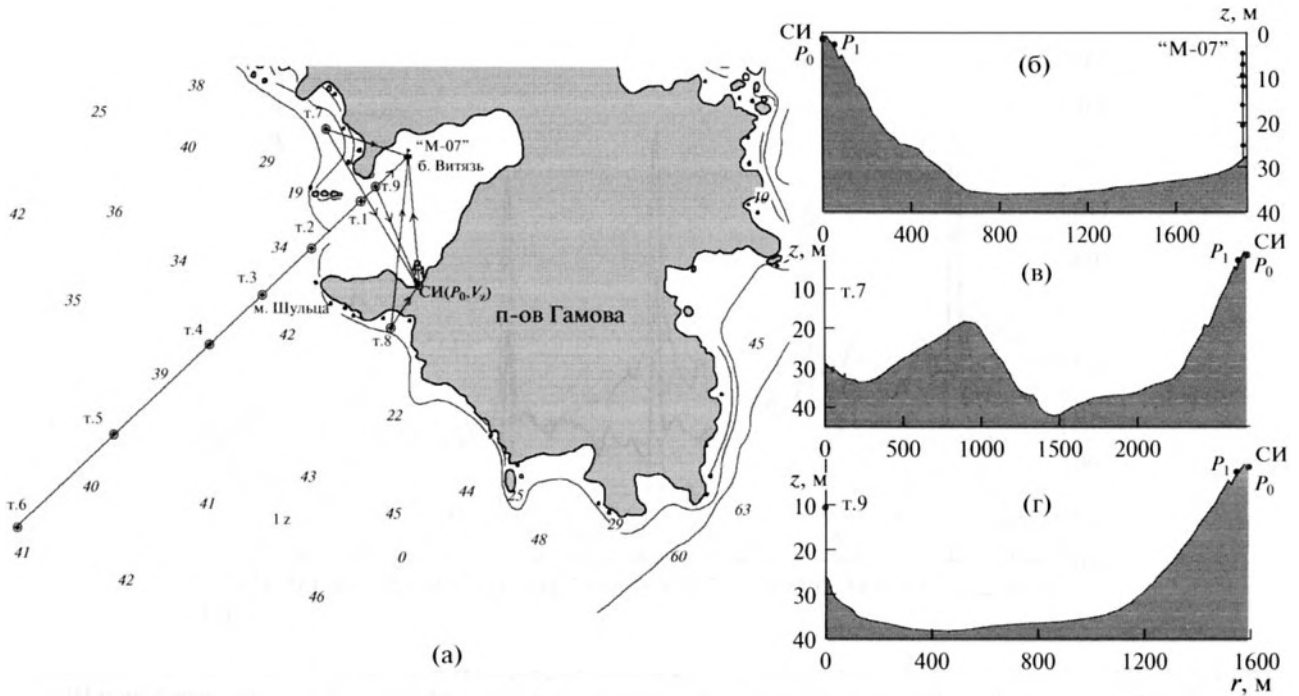


Рис. 1. Карта района с указанием точек излучения акустических т. 1–т. 9 и сейсмических – СИ тональных сигналов и их приема P_0 , V_z , P_1 , “М-07” (а), показаны профили дна на акустических трассах СИ – “М-07” (б), т. 7 – P_0 (в) и т. 9 – P_0 (г). Обозначения: СИ – сейсмоизлучатель, P_1 – гидрофон цифрового радиобуя, P_0 – опорный гидрофон СИ, установленный на берегу, т. 1–т. 9 – точки излучения акустических сигналов, “М-07” – автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система “Моллюск-07”.

чатера при глубине моря 3.4 м. В некоторых экспериментах применялся геофон типа А0515, который обеспечивает измерение вертикальной компоненты ускорения (V_z) в частотном диапазоне 0.1–100 Гц. В этой статье значения спектральной плотности мощности представляются в дБ по отношению к $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$ для вариаций акустического давления и к $576 \text{ нм}^2/\text{с}^4 \text{ Гц}$ для сигнала с геофона. Геофон устанавливался на поверхности песка и на поверхности массивной железобетонной фундаментной плиты. Аналоговые сигналы от данных метрологически аттестованных измерительных устройств с помощью 24-разрядной цифровой кабельной или 16-разрядной радиотелеметрической системы передавались на береговой приемно-регистрационный пост, где с помощью 4-портового асинхронного сервера NPort 5430I вводились в ЭВМ. Цифровая телеметрия исключила возможность искажения результатов акустических измерений влиянием на электронный тракт регистрации электромагнитных наводок от аппаратуры, обеспечивающей работу сейсмоизлучателя.

Для теоретических расчетов распространения тональных сигналов мы использовали адаптированную программу RAMS [16], основанную на решении широкоугольных параболических уравнений [17], полученных из стационарных уравне-

ний Ламе в цилиндрических координатах. Эта модель позволяет учитывать упругие свойства пород, слагающих дно. При решении уравнений используется метод конечных разностей в форме, известной как split-step Pade [16] на равномерной сетке с шагами dz и dr .

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ В БУХТЕ ВИТЯЗЬ

На рис. 1а приведена карта района с указанием точек излучения и приема сейсмических и акустических сигналов. На рис. 1б–1г показаны профили дна вдоль акустических трасс, на которых проведены экспериментальные исследования.

Начнем с рассмотрения результатов специальных методических измерений. На рис. 2 показаны графики оценок значений спектральной плотности мощности – $G(f)$ синхронно измеренных сигналов во время работы сейсмоизлучателя на частоте 27 Гц. График P_0 соответствует опорному акустическому сигналу, измеренному с помощью гидрофона в пластиковой бутылке с водой, установленной в 2 м от центра сейсмоизлучателя. Спектр сигнала, измеренного на расстоянии 10 м от излучателя с помощью геофона, показан графиком V_z . Кривая P_1 соответствует спектру аку-

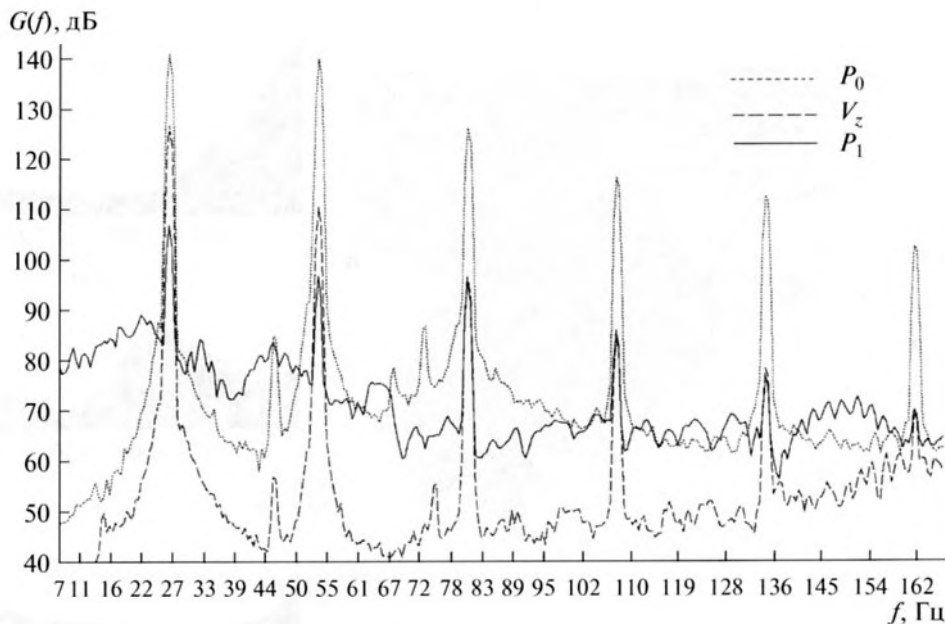


Рис. 2. Спектры сигналов, синхронно измеренных во время работы сейсмоизлучателя на частоте 27 Гц: на расстоянии 2 м от его центра, с помощью опорного гидрофона — P_0 , на расстоянии 10 м, геофоном — V_z , и 67 м, гидрофоном ЦРБ — P_1 , опущенным с края пирса на глубину 3.2 м.

стического сигнала, измеренного на расстоянии 67 м от излучателя на глубине 3.2 м с помощью гидрофона ЦРБ. Здесь необходимо отметить, что бутылка с опорным гидрофоном установлена возле поверхности (абсолютно мягкой границы), а максимальная амплитуда возбуждаемых в земле сейсмоизлучателем продольных и поперечных волн находится значительно глубже и поэтому значения функции $TL(f, r)$, рассчитанные относительно P_0 , занижены, как будет показано ниже, примерно на 20–30 дБ.

На рис. 2 видно, что сейсмоизлучатель так же, как и морской акустический излучатель электромагнитного типа, при работе в нелинейном режиме эффективно возбуждает колебания на резонансной частоте 27 Гц и ее гармониках. Энергия этих колебаний переносится в дне волнами разного типа (продольные, поперечные, поверхностные), эффективно озвучивает водный слой и регистрируется в воде в виде продольных акустических волн стандартным гидрофоном.

Поскольку толщина водного слоя вдоль трассы распространения от излучателя до края пирса меньше 3.4 м, то колебания с частотой меньше 180 Гц не могли возбудить в водном слое нормальные водные моды, а потери при распространении для сейсмических волн увеличиваются с ростом частоты сигнала. Однако на рис. 2а видно, что относительные потери на распространение минимальны, составляя –31 дБ у дна для тональных сигналов с частотой 81 и 108 Гц, и максимальны – –43 дБ для сигнала с частотой 54 Гц. Гра-

фики $TL(z)$, представленные на рис. 3а, иллюстрируют зависимость потерь от близости к поверхности моря. На этом рисунке видно, что в приповерхностном 50-см слое воды на всех частотах потери резко увеличиваются на 15–20 дБ. На рис. 3б показано вертикальное распределение функции потерь в акустическом поле, формируемым тональными сейсмическими сигналами в точке установки “Моллюска-07”. На рис. 1 эта точка обозначена как “М-07”.

Измерения показали, что при распространении вдоль береговой линии потери минимальны для акустического сигнала ТОН-27 Гц. Для акустического сигнала ТОН-54 Гц, согласно графикам, представленным на рис. 3, потери максимальны на краю пирса, но зато в точке “М-07”, удаленной от СИ на 1.9 км, потери для этого сигнала минимальны во всем водном слое и составляют –52 дБ. Для сигнала ТОН-27 Гц потери в этой точке превышают –70 дБ.

По-видимому, эти эффекты связаны с установкой опорного гидрофона P_0 у поверхности земли и поэтому он дает очень грубое приближение истинных амплитудных значений сейсмических волн возбуждаемых СИ. Кроме того, при распространении в реальном геоакустическом волноводе (см. рис. 1б) энергия этих колебаний при выходе из земли в воду может возбудить водные моды, которые распространяются в воде с меньшими потерями, чем в дне, но они интерферируют с донными модами и продольными волнами, отра-

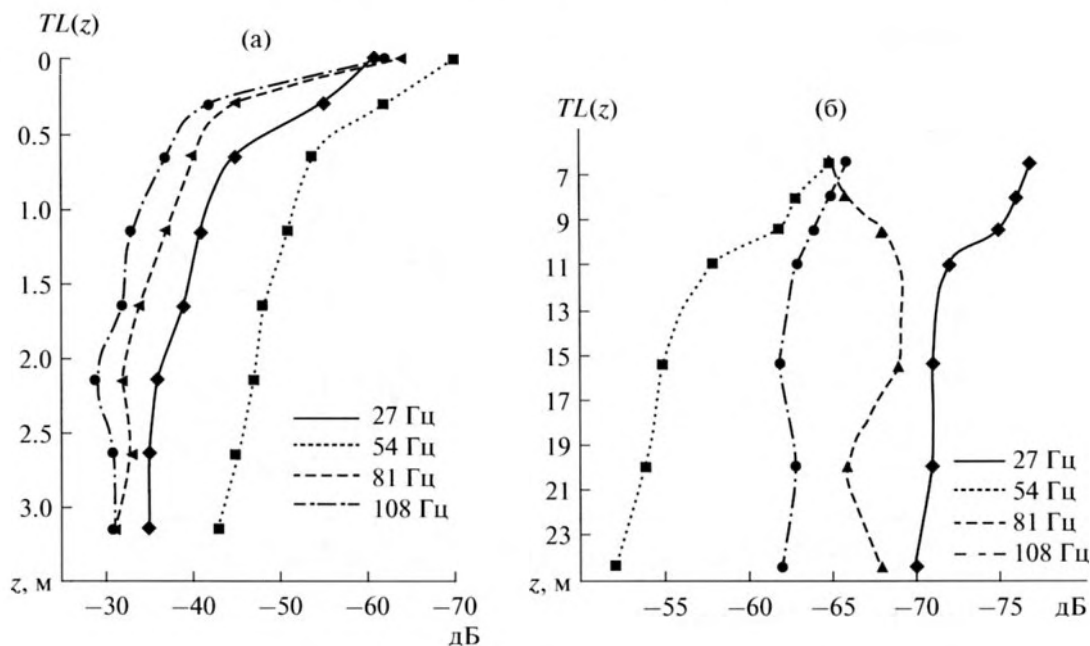


Рис. 3. Зависимость значений потерь для акустических полей, формируемых сейсмоизлучателем от горизонта z в море с глубиной 3.4 м (а) и 28 м (б).

женными и преломленными в глубинных слоях пород, слагающих дно.

Для иллюстрации трансформации энергии продольных акустических волн в волны другого типа и обратно в продольные был проведен эксперимент на трассах т. 8 – “М-07” и т. 8 – P_0 , V_z . На рис. 1а видно, что эти трассы пересекают м. Шульца и протяженность сухопутного участка превышает 450 м. Отметим, что южный берег м. Шульца и полуострова 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. На рис. 4 показаны спектры сигналов, синхронно измеренных на берегу с помощью гидрофона P_0 и геофона V_z , а также с помощью семи гидрофонов вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы “Моллюск-07”, установленной в б. Витязь в точке “М-07” (см. рис. 1). Акустический сигнал ТОН-18 Гц с гармониками излучался в точке т. 8, показанной на рис. 1а, с помощью излучателя, свешенного на горизонт 10 м с борта судна “Малыхит”. На рис. 4 видно, что все приемные системы зарегистрировали этот сигнал и две его гармоники. В табл. 1 представлены результаты анализа измерений на трех трассах, показанных на рис. 1, из которых следует, что гидрофон P_0 записал акустический сигнал ТОН-55 Гц, который распространился через м. Шульца с наименьшими потерями, равными –88 дБ, а до точки “М-07” он распространился с потерями, равными –78 дБ.

До точки “М-07” с минимальными –72 дБ потерями распространилась энергия сигнала ТОН-18 Гц. Данные, представленные в этой таблице, не позволяют в точках приема выявить зависимость значения потерь от частоты колебаний. По-видимому, это обусловлено интерференцией волн разного типа, которые переносят энергию тонального сигнала на данной частоте.

На рис. 5а показан модельный геоакустический волновод, построенный для акустического профиля т. 8 – “М-07”, а на рис. 5б, 5в приведены результаты численного моделирования и показаны экспериментальные значения потерь, измеренные в точках приема P_0 и “М-07”. Расчеты были проведены с помощью модифицированной программы RAMS [14], учитывающей упругие свойства пород, слагающих дно. На рис. 1 видно, что этот акустический профиль пересекает узкий перешеек мыса Шульца. При моделировании мы полагаем, что точки т. 8, P_0 и “М-07” расположены на одной линии и ширина перешейка равна 510 м. Излучатель находится на глубине 10 м в точке т. 8, удаленной от скалистого и обрывистого южного берега м. Шульца на 200 м, а точка P_0 находится на расстоянии 10 м от уреза воды относительно пологого южного берега м. Шульца.

Обсуждаемые в данной работе результаты акустических измерений были проведены весной или осенью во второй половине октября. В это время сезонный пикноклин слабо выражен. Кроме того, в работе [18] было показано, что при пересечении волной внутреннего прилива акусти-

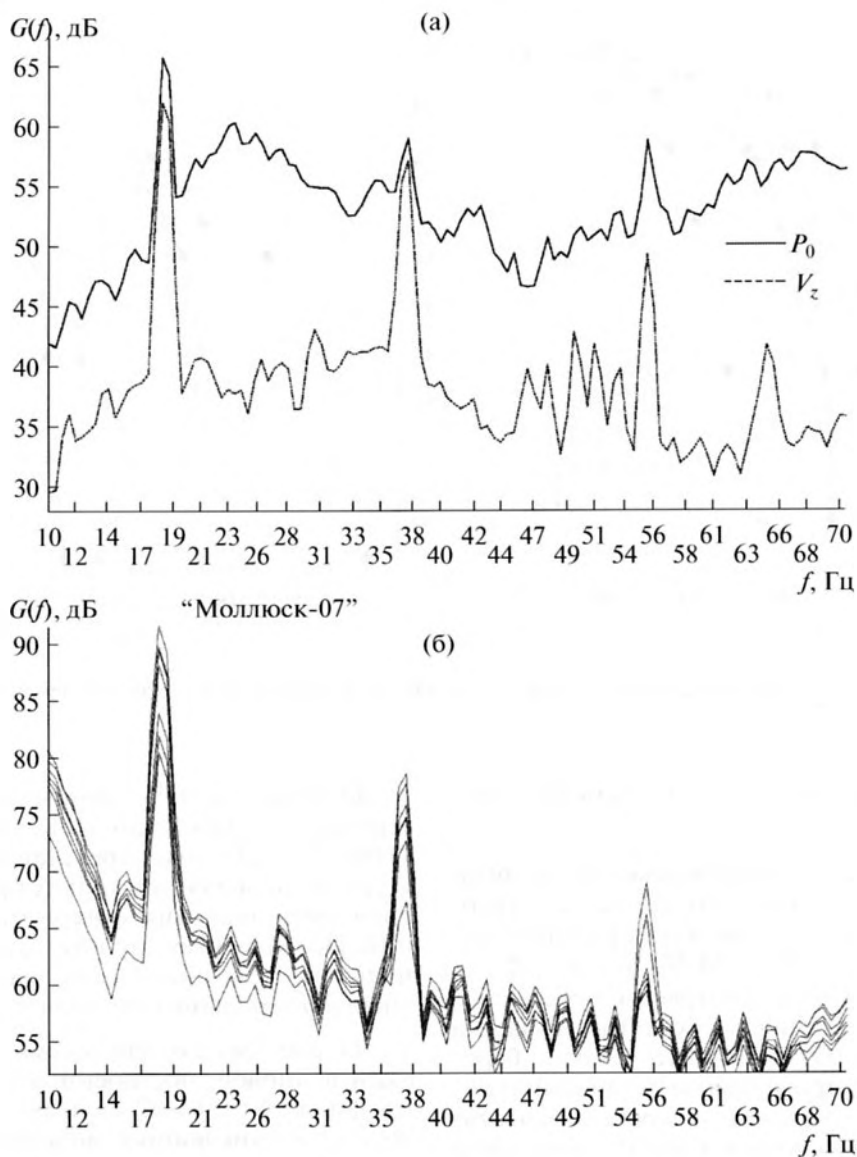


Рис. 4. Оценки спектров тональных сигналов, измеренных на берегу гидрофоном P_0 и геофоном V_z (а), а также гидрофонами "Моллюск-07" в точке "М-07" (б) во время работы излучателя, свешенного с борта НИС "Малахит" на глубину 10 м в точке т. 8.

ческой трассы длиной 10.5 км, организованной в данном районе шельфа в июне 2008 г., сезонный термоклин сместился по вертикали на ≈ 10 м, но это практически не изменило значения функции потерь на частотах меньше 70 Гц, а на более высоких частотах (меньше 200 Гц), потери уменьшились на величину меньше 6 дБ. Поэтому для упрощения расчетов водный слой в модельном геоакустическом волноводе принят однородным со значением $C_p = 1470$ м/с.

Для работы программы RAMS необходимо наличие водного слоя вдоль всего акустического профиля, толщина которого должна быть не менее $2\Delta z$, где Δz — дискретный шаг по вертикали. Данные расчеты были проведены для геоакусти-

ческого волновода с толщиной водного слоя на суше, равной $4\Delta z = 0.8$ м. Над 80 см слоем воды показан реальный профиль берегового участка, который не использовался при моделировании. На рис. 5а видно, что расчеты проводились для однородной гидрологии с двухслойным дном. В дне на горизонте $z_1 = 86$ м изменяются вертикальные градиенты основных акустических параметров пород, слагающих дно. Такая модель дна была построена на основе геофизических представлений и выборе горизонта z_1 , при котором было наилучшее согласование между модельными и экспериментальными значениями потерь по методу наименьших квадратов. Графики потерь — $TL(r)$, представленные на рис. 5б, получены для приемни-

Таблица 1. Значения потерь для тональных сигналов с разными частотами, измеренными на трассах, показанных на рис. 1

Излучение	Прием	r , км	f , Гц	TL , дБ, “М-07”		TL , дБ, P_0		TL , дБ, P_1	
				Эксп.	Модел.	Эксп.	Модел.	Эксп.	Модел.
т. 8 14.05.2012	“М-07” “Берег”	2.5 0.7	14	-75	-76	-99	-86		
			16	-83	-80	-104	-92		
			18	-72	-72	-97	-97		
			24	-81	-65	-105	-97		
			32	-77	-77	-99	-99		
			48	-82	-82	-93	-93		
			55	-78	-87	-88	-92		
т. 7 16.05.2012	“М-07” “Берег”	1.3 2.7	27	-74	-70		-100	-91	-90
			54	-72	-69		-102	-93	-93
			81	-70	-70		-105	-63	-66
			108	-76	-84	-86	-103	-45	-53
			135	-74	-75	-72	-96	-44	-49
			162	-77	-74	-79	-93	-45	-48
			189	-74	-78	-76	-89	-46	-48
т. 9 16.05.2012	“М-07” “Берег”	0.7 1.6	24	-64		-114		-85	
			42	-53		-94		-62	
			56	-47		-84		-55	
			71	-43		-73		-48	
			85	-45		-64		-42	
			114	-37		-70		-46	
			186	-38		-74		-44	

ка, перемещаемого на горизонте $z = 20$ см, с усреднением по r на интервале 50 м. На рис. 5в графики $TL(r)$ получены по той же методике, что и значения в эксперименте, но с дополнительным усреднением по r на интервале 50 м.

Экспериментальные значения соответствуют значениям TL , полученным при анализе акустических измерений, проведенных в точке P_0 с помощью гидрофона, установленного в пластиковой бутылки с водой, закопанной в песок, а в точке “М-07” – с помощью семи гидрофонов “Моллюска-07”. Экспериментальное значение TL в точке “М-07” соответствует среднему значению интенсивности акустического сигнала, синхронно измеренного семью гидрофонами, перекрывающими слой воды толщиной 20 м.

На рис. 5б и в табл. 1 видно, что модельные значения потерь хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Согласно графикам $TL(r)$, представленным на рис. 5в, модельные значения в б. Витязь также хорошо согласуются с экспериментальными значениями, измеренными с помощью семи гидрофонов “Моллюска-07”.

На рис. 1а видно, что еще одна геоакустическая трасса т. 7 – “М-07” имеет примерно 350-м

сухопутный участок, а на трассе т. 7 – P_1 , P_0 в профиле дна, показанном на рис. 1в, на расстоянии 1 км от точки излучения т. 7 глубина моря уменьшается до 18 м, а затем снова увеличивается до 39 м. Согласно рис. 1а при излучении в точке т. 7 энергия акустических сигналов, принятых “Моллюска-07” (см. рис. 6б), была принесена волнами, прошедшими через сухопутный участок, поскольку энергией акустических волн, отразившихся от относительно пологого северного берега м. Шульца, по-видимому, можно пренебречь.

В табл. 1 приведены результаты анализа экспериментальных и модельных значений потерь для тональных сигналов с разными частотами, распространяющихся вдоль трассы т. 7 – “М-07” и т. 7 – P_1 , P_0 . Численное моделирование было проведено с помощью программы RAMS для соответствующих геоакустических волноводов с подобными акустическими параметрами пород, слагающих дно. Для тональных сигналов с частотами 27–189 Гц, принятыми в точке “М-07”, потери на распространение колеблются от –70 до –77 дБ без выраженного частотного эффекта.

Потери на распространение до P_1 (глубина моря в точке приема равна 3.4 м) для сигнала ТОН-27 Гц

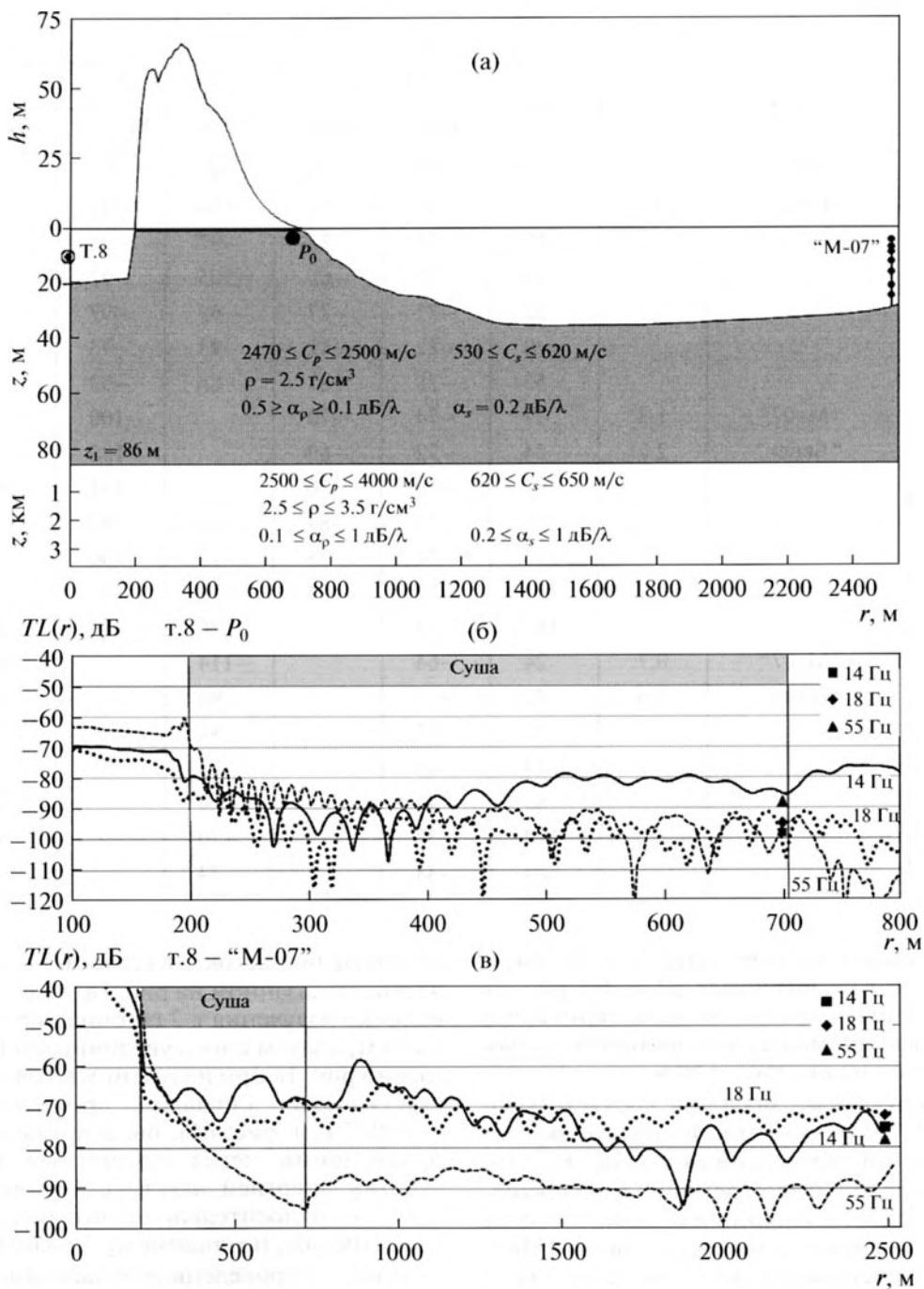


Рис. 5. Модельный геоакустический волновод для трассы т. 8 – “М-07” (а) и результаты расчетов значений функции потерь – $TL(r)$, проведенных для приемника, перемещаемого на горизонте $z = 20$ см (б) и в слое толщиной 20 м (в). Обозначения: C_p – значение скорости продольных волн, C_s – значение скорости поперечных волн, ρ – плотность, α_p и α_s – коэффициенты затухания при распространении в дне для продольных и поперечных волн, h – высота берега относительно уровня моря. Значками показаны экспериментальные значения.

составили –91 дБ, а для сигнала ТОН-54 Гц – –93 дБ. В акустическом сигнале, измеренном на берегу гидрофоном P_0 , только энергия сигналов с частотами больше 100 Гц превысила фоновые шумы и соответствующие значения потерь для сигнала ТОН-108 Гц составили –86 дБ, а в точке P_1

они равны –45 дБ. В табл. 1 видно, что относительные потери между точками P_1 и P_0 для сигналов с частотами 108–189 Гц составляют примерно –33 дБ.

Поскольку толщина водного слоя в точке P_1 равна 3.4 м и согласно графикам $TL(z)$ зависимо-

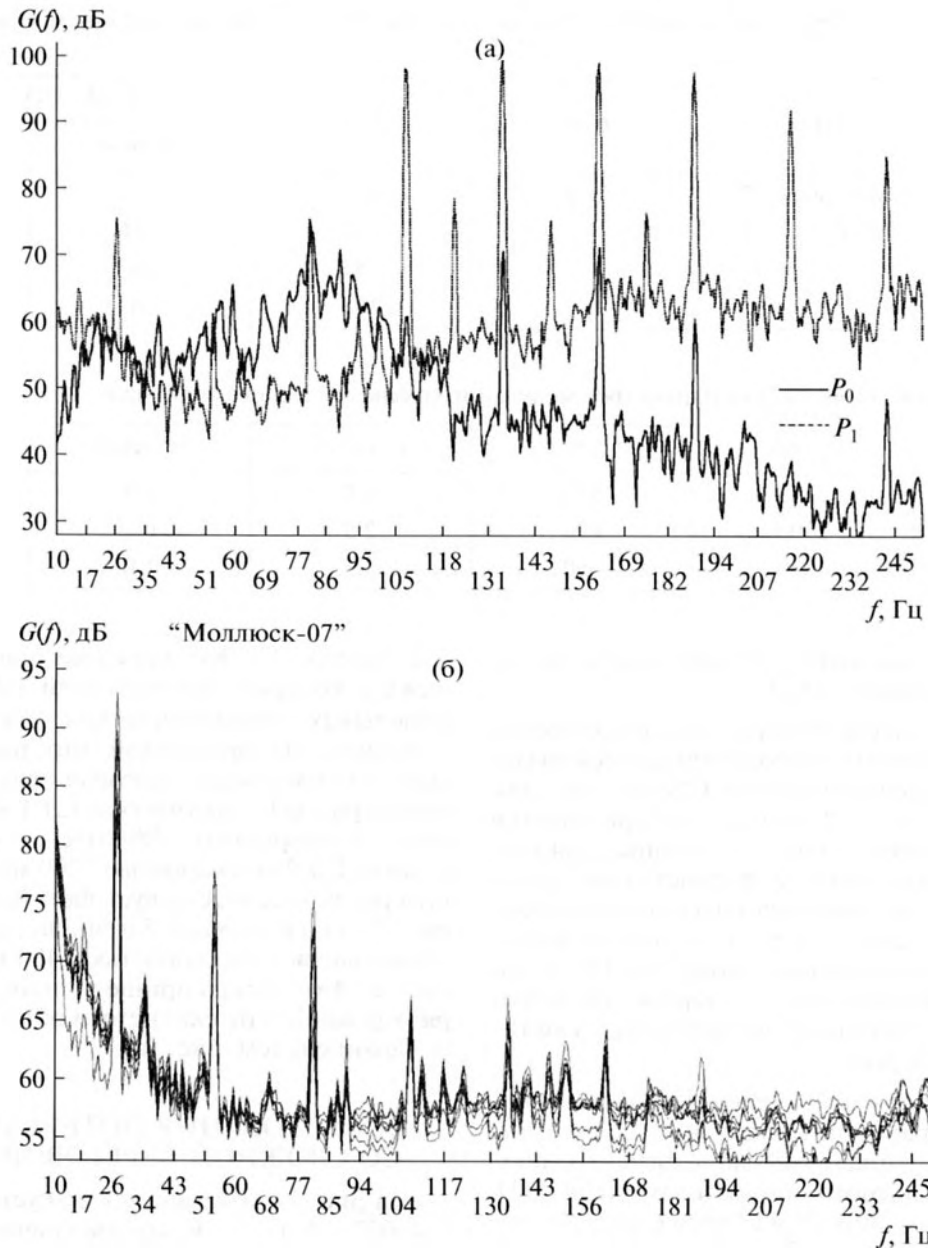


Рис. 6. Оценки спектров тональных сигналов измеренных на берегу гидрофоном P_0 и в море гидрофоном P_1 (а), а также гидрофонами "Моллюска-07" (б), во время работы излучателя, свешенного с борта НИС "Малахит" на глубину 10 м в точке т. 7.

сти значения относительных потерь от близости гидрофона к поверхности моря, представленным на рис. 2а, можно констатировать, что наш опорный для СИ гидрофон P_0 действительно показывает заниженные примерно на 30 дБ значения потерь на распространение.

На рис. 1в показан профиль дна на акустической трассе т. 7 — P_0 . Из него следует, что на трассе есть возвышенность, которая отсекает водные моды для звука с частотами меньше 80 Гц. Это подтверждают значения относительных потерь для

точки P_1 . Действительно, для сигнала ТОН-54 Гц потери равны -93 дБ, для сигнала ТОН-81 Гц потери меньше на 30 дБ, а для сигнала ТОН-108 Гц потери меньше на 48 дБ.

Для исключения влияния подводной возвышенности излучение было произведено из точки т. 9 (см. рис. 1). На рис. 1г показан профиль дна на трассе т. 9 — P_0 , а в табл. 1 приведены результаты анализа акустических измерений на этой трассе. В этом случае излученные акустические сигналы были приняты в точках P_1 и P_0 на

Таблица 2. Значения потерь для тональных сигналов с разными частотами, измеренными на трассе “Берег” СИ – “М-07”

Излучение	Прием	r , км	f , Гц	TL , дБ, СИ – “М-07”	
				Эксперимент	Модель
“Берег” СИ	“Моллюск-07” “М-07”	1.9	27	–71	–86
			54	–56	–98
			81	–67	–97
			108	–63	–92

Таблица 3. Значения акустических параметров модельного геоакустического волновода

z , м	C_p , м/с	C_s , м/с	ρ , г/см ³	α_p , дБ/λ	α_s , дБ/λ
0	2250	550	1.1	0.5	0.5
90	2500	620	2.5	0.1	0.2
3600	4000	650	3.5	1.0	1.0

всех частотах и значение средних потерь между этими точками равно –28 дБ.

Результаты анализа потерь для акустических сигналов, формируемых в бухте Витязь сейсмоизлучателем, установленным в точке СИ (см. рис. 1а), представлены в табл. 2. В этой таблице приведены и модельные значения потерь, полученные для геоакустического волновода с параметрами, показанными на рис. 5а для точечного источника расположенного на горизонте $z = 1.5$ м. Как и ожидалось, значения модельных потерь на 15–30 дБ больше, чем в эксперименте с опорным гидрофоном – P_0 , установленным у поверхности в пластиковой бутылки с водой.

В октябре 2012 г. с целью оценки значения скорости распространения продольных волн в дне был проведен специальный эксперимент с применением импульсного пневмоизлучателя [11], свешенного на глубину 10 м с борта судна “Малахит”, и двух ЦРБ. На рис. 7а приведена карта района с указанием точек излучения, приема и двух трасс, вдоль которых могла распространяться энергия акустического импульса, показанного на рис. 7б. На рис. 7в показаны вариации акустического давления, измеренные у дна в точке, обозначенной на рис. 7а как ЦРБ. Глубина моря в точке, излучения была равна 20 м, а в точке приема – 34 м. Расстояние от излучателя до приемника – $L.1 \approx 1500$ м.

На рис. 7г видно, что данный излучатель формирует акустический импульс с максимальным уровнем спектральной плотности мощности колебаний на частоте 80 Гц (см. график 1). В точке приема зафиксирована энергия этого импульса уже на временном интервале 2, которому соответствует скорость распространения 2200 м/с. Причем с такой скоростью распространилась энергия в частотных диапазонах 34–53 Гц и 65–90 Гц

(см. график 2). Это значение близко к величинам C_p , которые мы получили при построении модельных геоакустических волноводов для б. Витязь. На временном интервале 3 пришла энергия импульса, которая распространялась вдоль трассы L.1 на участках L.1.1 и L.1.3 в водном слое со скоростью 1480 м/с, а на сухопутном участке L.1.2 со скоростью 2200 м/с. Временному интервалу 4 соответствует фон (см. график 4 на рис. 7), а на интервале 5 пришла энергия, распространившаяся со скоростью 1480 м/с вдоль трассы L.2. Этот сигнал пришел в точку ЦРБ благодаря отражению от скалистого обрывистого берега о. Таранцева (см. рис. 7а).

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ НА ТРАССЕ СО СЛОЖНОЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИЕЙ

На рис. 1а показана 8 км акустическая трасса “М-07” – т. 1, ... т. 6, которая начинается в б. Витязь, а заканчивается в заливе Посыета. На рис. 8 показан профиль дна на этой трассе, а в табл. 3 приведены акустические параметры дна в модельном геоакустическом волноводе, который применялся в численных экспериментах. Экспериментальные графики зависимости потерь $TL(r)$ от дистанции по акустическим измерениям, проведенным с помощью “Моллюска-07” и морского НЧ-излучателя, опускаемого на горизонт 10 м с борта судна “Малахит”, дрейфующего в точках т. 1–т. 6, представлены на рис. 8б. На этом рисунке хорошо выражена зависимость значений потерь от частоты излучаемого сигнала. Рассмотрим точку излучения т. 1 – 1 км. Разница в значениях потерь для сигналов с частотами 27 и 216 Гц для этой точки достигает 25 дБ, а в точке излучения т. 6 (8 км) это различие достигло 38 дБ. Зависимость значений потерь от частоты определяется

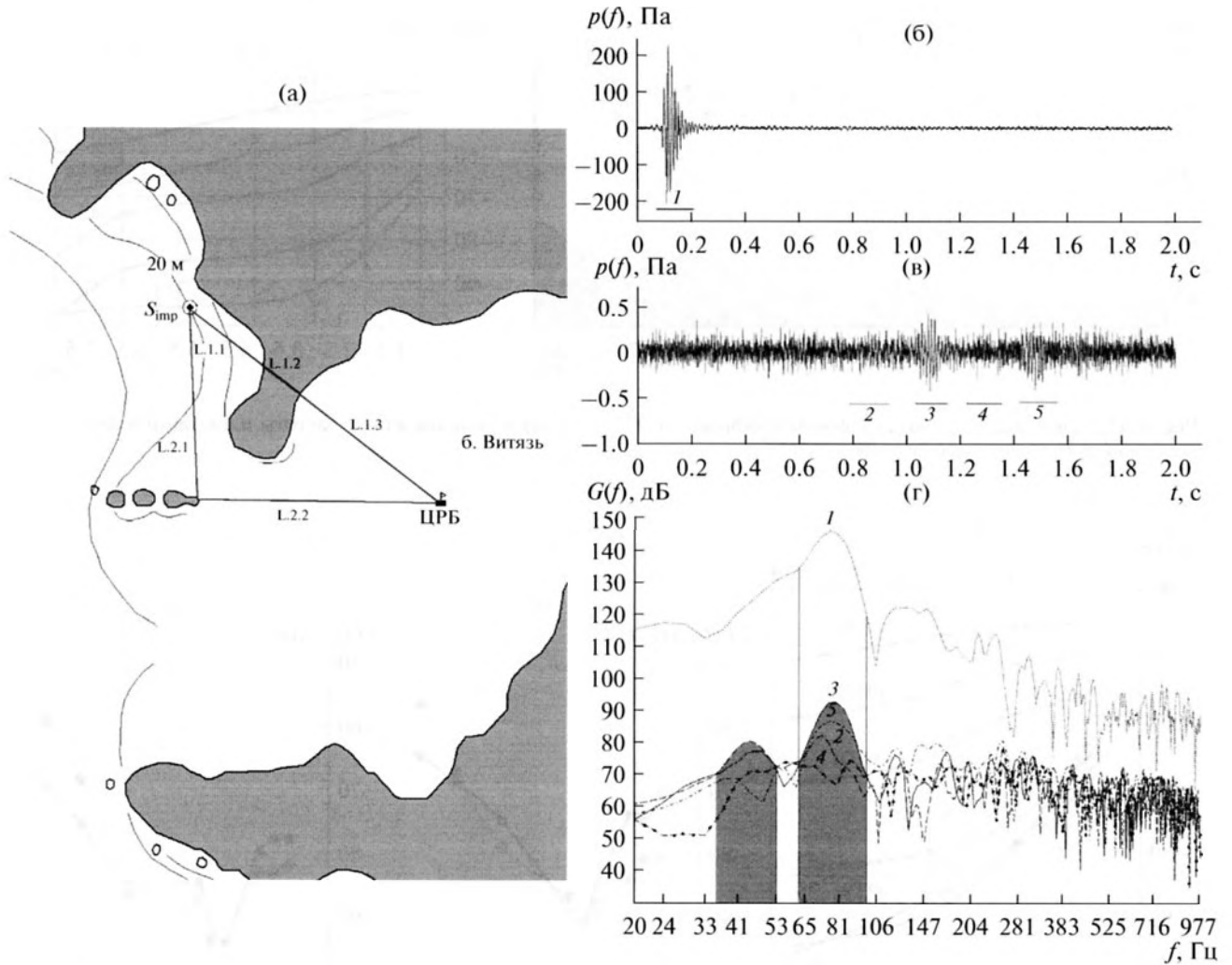


Рис. 7. Карта района с указанием точки излучения импульсного сигнала – S_{imp} , точки установки цифрового радиобуя ЦРБ и двух трасс возможного распространения (а). Вариации акустического давления, измеренные с помощью двух ЦРБ на расстоянии 23 м (б) и 1500 м (в) от излучателя, и оценки их спектров, рассчитанные на указанных цифрами временных интервалах (г).

типами волн, которые переносят энергию возбуждаемых колебаний. Это, прежде всего, продольные волны, которые в виде водных (260 Гц) и донно-водных (27–108 Гц) волн, распространяются в водном слое, захватывая слой осадков. На частоте 16 Гц энергия, по-видимому, переносится в дне, озвучивая водный слой, потери на распространение для этого сигнала на профиле “М-07” – т. 5 оказываются на 5–10 дБ меньше, чем для сигнала ТОН-27 Гц.

На рис. 9 представлены экспериментальные графики функции $TL(f, r)$, построенные для акустического профиля “М-07” – т. 4. На этом участке акустического профиля “М-07” – т. 6 (см. рис. 1а) для четырех точек излучения удалось получить надежные значения потерь для тональных сигналов с частотами 14, 16, 18, 24, 27, 30, 54, 81, 108 и 216 Гц, которые количественно характеризуют осо-

бенности переноса энергии возбуждаемых в воде колебаний до точки установки “Моллюска-07”. На рис. 1а видно, что если точки излучения т. 1 и т. 2 расположены в бухте и у входа в б. Витязь, то точка т. 4 находится на шельфе – в заливе Посыета. Графики $TL(r)$, представленные на рис. 9а, иллюстрируют четкую зависимость потерь от частоты сигнала. С наименьшими потерями распространяются водные моды акустических сигналов с частотами 216 и 108 Гц. На формирование акустического поля сигналом ТОН-81 Гц оказывает влияние поглощение его энергии в дне. На расстоянии 1 км от излучателя значение потерь на этой частоте на 10 дБ больше, чем в поле, формируемом сигналом ТОН-216 Гц.

Максимальные значения потерь –92 дБ на расстоянии 3 км наблюдается в поле сигнала ТОН-27 Гц. По-видимому, это связано с отсечкой

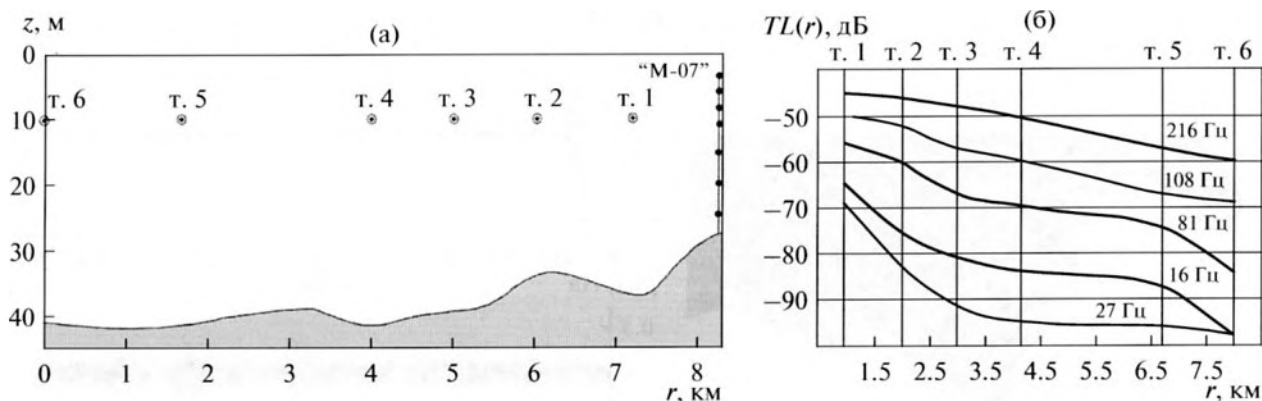


Рис. 8. Профиль дна на геоакустическом профиле "М-07" – т. 6 (а) и зависимость от частоты и дистанции функции потерь $TL(f, r)$ на этом профиле (б).

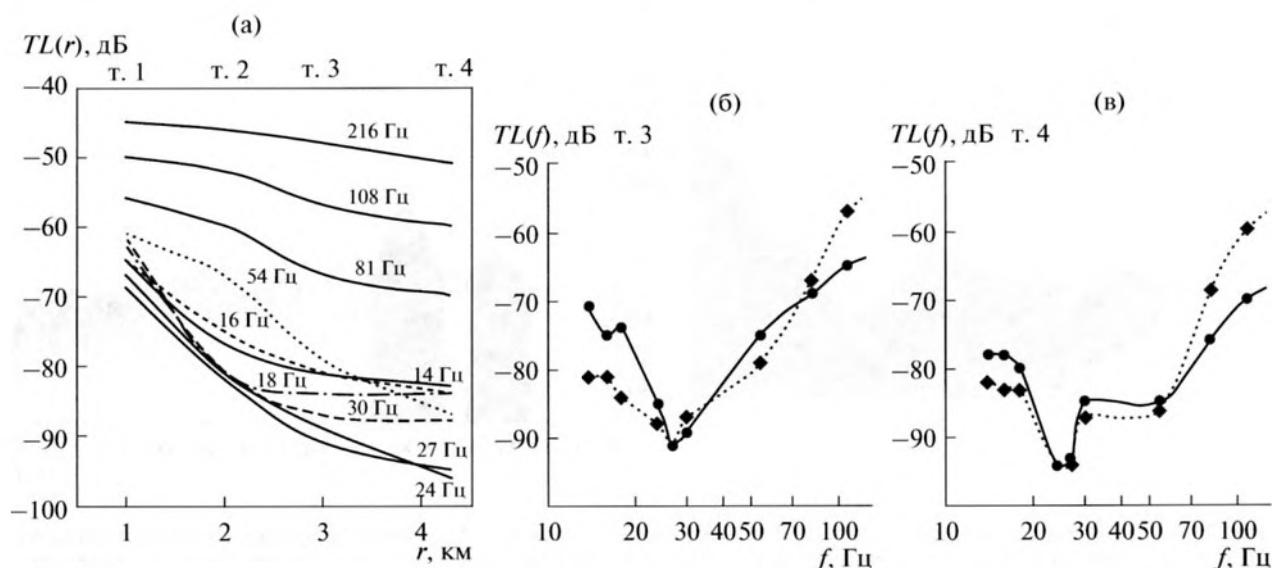


Рис. 9. Экспериментальные (а) и модельные зависимости от дистанции и частоты функции потерь $TL(f, r)$ на профиле "М-07" – т. 4 (см. рис. 7а). Модельные функции потерь $TL(f)$ для точек излучения т. 3 и т. 4 показаны на рисунках (б) и (в) сплошной линией, а экспериментальные – штриховой.

водно-донной моды, которая приводит на дистанциях больше 2.5 км к стабилизации уровня акустического поля с частотой 30 Гц, но на частоте 18 Гц такая стабилизация наступает раньше, а потери меньше, чем для сигнала ТОН-30 Гц. Это можно объяснить озвучиванием водного слоя продольными и поверхностными волнами, распространяющимися в дне. На рис. 9 видно, что потери уменьшаются с уменьшением частоты генерируемого в воде акустического сигнала. На расстоянии 4.3 км потери для сигнала ТОН-14 Гц составляют -83 дБ и относительно точки излучения т. 1 (1 км) -18 дБ, а для сигнала ТОН-54 Гц: -87 и -27 дБ соответственно. По-видимому, это связано с тем, что поглощение в дне энергии поверхностных или сейсмических колебаний уменьшается с уменьшением

их частоты. На рис. 9б, 9в видно, что результаты численного моделирования проведенного для геоакустического волновода с параметрами, показанными в табл. 3, согласуются с экспериментальными данными. Отметим хорошее согласие в зависимости значений экспериментальной и теоретической функции потерь от частоты колебаний.

На рис. 8б видно, что для точки излучения т. 6, удаленной от "Моллюска-07" на 8 км, потери для акустических сигналов, генерируемых с частотой 16 и 27 Гц, стали равными. По-видимому, это связано с удалением от п-ова Гамова и, соответственно, с углублением коренных пород, слагающих дно, и увеличением толщины осадочных пород, накопленных в заливе Посьета, в том числе принесенных водами реки Туманган.

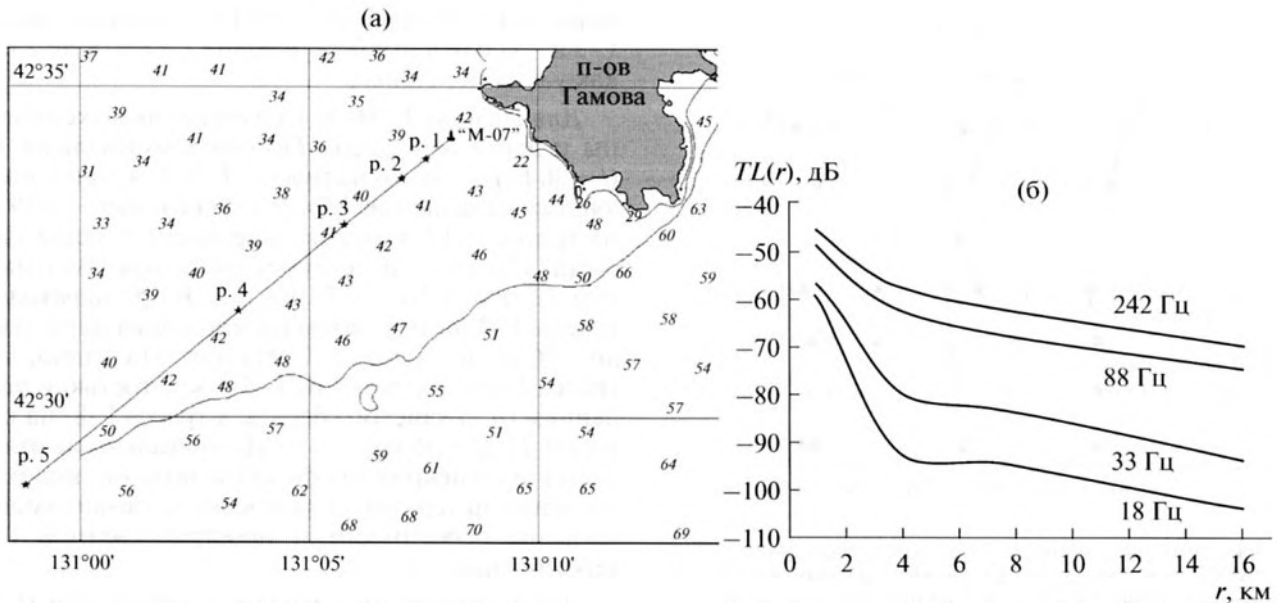


Рис. 10. Карта района с указанием точек излучения акустических тональных сигналов р. 1–р. 5, их приема с помощью гидрофонов “Моллюска-07”, установленного в точке “М-07” (а), и результаты анализа этих измерений (б).

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ НА РАВНОГЛУБИННОЙ ТРАССЕ В ЗАЛИВЕ ПОСЬЕТА

Сравним результаты измерений, проведенных в б. Витязь, с результатами подобных исследований, проведенных в заливе Посьета, когда “Моллюск-07” был установлен на шельфе в точке с глубиной моря, равной 42 м. Схема этого эксперимента и результаты анализа функции потерь представлены на рис. 10. На этом рисунке видно, что акустическую трассу “М-07” – р. 5, имеющую протяженность 16 км, можно считать равноглубинной со средней глубиной, равной 42 м. Выше при рассмотрении результатов измерений, проведенных на акустическом профиле “М-07” – т. 6, мы предположили, что при удалении от п-ова Гамова имеет место заглубление коренных пород, слагающих дно, и увеличение толщины осадков, что приводит к увеличению потерь на низких частотах из-за невозможности распространения энергии колебаний в дне в виде поверхностных и сдвиговых волн. С другой стороны, осадки с акустическими параметрами в придонном слое, близкими к водным, позволяют распространяться продольным волнам в виде донно-водных мод. По-видимому, этим можно объяснить зависимость значений $TL(f, r)$ от параметра r . На всех частотах относительные потери между точками излучения р. 3 (4 км) и р. 5 (16 км) примерно равны –12 дБ. Этот результат существенно отличается от частотной зависимости значений потерь на низких частотах, полученной при установке “Моллюска-07” в б. Витязь (см. рис. 8). Для сигнала ТОН-18 Гц можно отметить уменьшение по-

терь на дистанции 7 км. Это обусловлено пространственной интерференцией продольных волн, рефрагированных и преломленных в дне. Возможность такого эффекта показывают модельные расчеты, проведенные для соответствующего данному акустическому профилю геоакустическому волноводу.

Рассмотрим вертикальное распределение функции $TL(z)$, формируемой тональными акустическими сигналами, излученными на дистанциях 1 и 16 км. Результаты такого анализа приведены на рис. 11. Для звука с частотой 33 Гц в данном волноводу наблюдается одномодовое распространение, причем потери максимальны для верхнего гидрофона “Моллюска-07”, расположенного на горизонте 9 м. Это обусловлено близостью к нему акустически “мягкой” границы – поверхности моря. График, соответствующий сигналу ТОН-66 Гц для точки излучения р. 1 (1 км), иллюстрирует интерференцию 1-й и 2-й водной моды, но при распространении на 16 км из-за больших потерь вторая мода затухает и график $TL(z)$ в точке “М-07” соответствует первой водной моде с максимальной интенсивностью на горизонте 29 м. Для сигнала ТОН-132 Гц форма графика $TL(z)$ подобна для обеих точек излучения.

Рассмотрим зависимость значений функции потерь на дистанции 2 км от частоты генерируемого акустического сигнала и пространственной ориентации акустической трассы, а значит, от акустических свойств пород, слагающих дно в точке излучения. Такое сравнение можно сделать по результатам акустических измерений на 12 трассах, показанных на рис. 12а. Поскольку

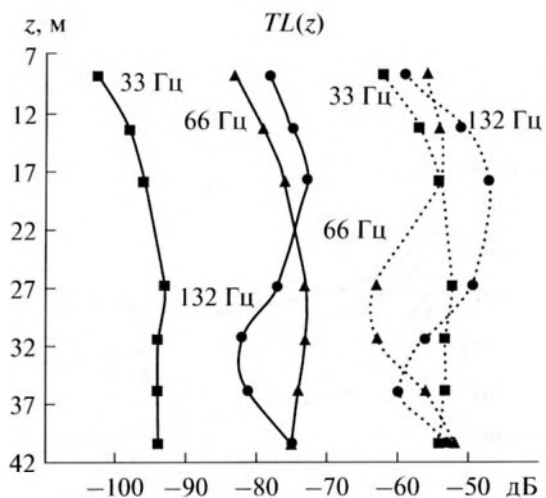


Рис. 11. Функции потерь $TL(z)$, измеренные на трассе “М-07” — р. 5 во время излучения тональных сигналов на дистанциях 1 км (см. р. 1 на рис. 10), для которых графики показаны штриховой линией, и 16 км (р. 5), для которых графики показаны сплошной линией.

трассы L-2–L-6 подходят к скалистому берегу п-ова Гамова, то можно предположить близость коренных пород в соответствующих точках излучения, а на трассах L-10–L-12 существенное увеличение толщины осадков. Результаты оценок значений потерь, измеренных на этих трассах на разных частотах, представлены на рис. 12б. На этом рисунке видно, что, как и ожидалось, изменения $TL(f=162 \text{ Гц})$ от пространственной ориентации трассы распространения незначительны —

меньше 10 дБ. Надо учитывать, что длина трассы L-3 из-за близости берега равна 1.5 км, а не 2 км, как у всех остальных.

Для сигнала ТОН-36 Гц изменения максимальны и достигают 22 дБ. Потери максимальны $TL(f=36 \text{ Гц}) = -80$ дБ на трассах L-3, L-4, приближающихся к скалистому берегу, и минимальны — -59 дБ на трассе L-12, которая направлена в залив Посыета. Следует также отметить резкое уменьшение $TL(f=36 \text{ Гц})$ с -79 до -62 дБ при переходе с трассы L-4 на L-5, затем потери снова нарастают до -76 дБ на трассе L-8. На рис. 11а видно, что трасса L-5 отличается от L-4 открытостью и удалением от скалистого берега, а трасса L-8, на которой $TL(f=36 \text{ Гц}) = -76$ дБ, визуально не отличается от ближних профилей и поэтому высокие значения потерь на этом профиле, по-видимому, вызваны особенностями пространственной интерференции.

Для акустических сигналов с частотой 16 и 18 Гц значения потерь колеблются около -80 дБ, но можно отметить их стабилизацию и уменьшение на трассах L-9–L-11. Причем на этих трассах потери для сигнала ТОН-18 Гц примерно на 5 дБ меньше, чем для сигнала ТОН-16 Гц. На трассах, приближающихся к скалам L-3, L-4, наоборот, потери для сигнала с частотой 16 Гц на 5–10 дБ были меньше, чем для сигнала 18 Гц. Возможно, на трассах L-9–L-11 слой осадков позволяет сформироваться на этих частотах распространяющимся донно-водным акустическим модам.

В заключение отметим, что из-за ярко выраженной зависимости значений функции потерь

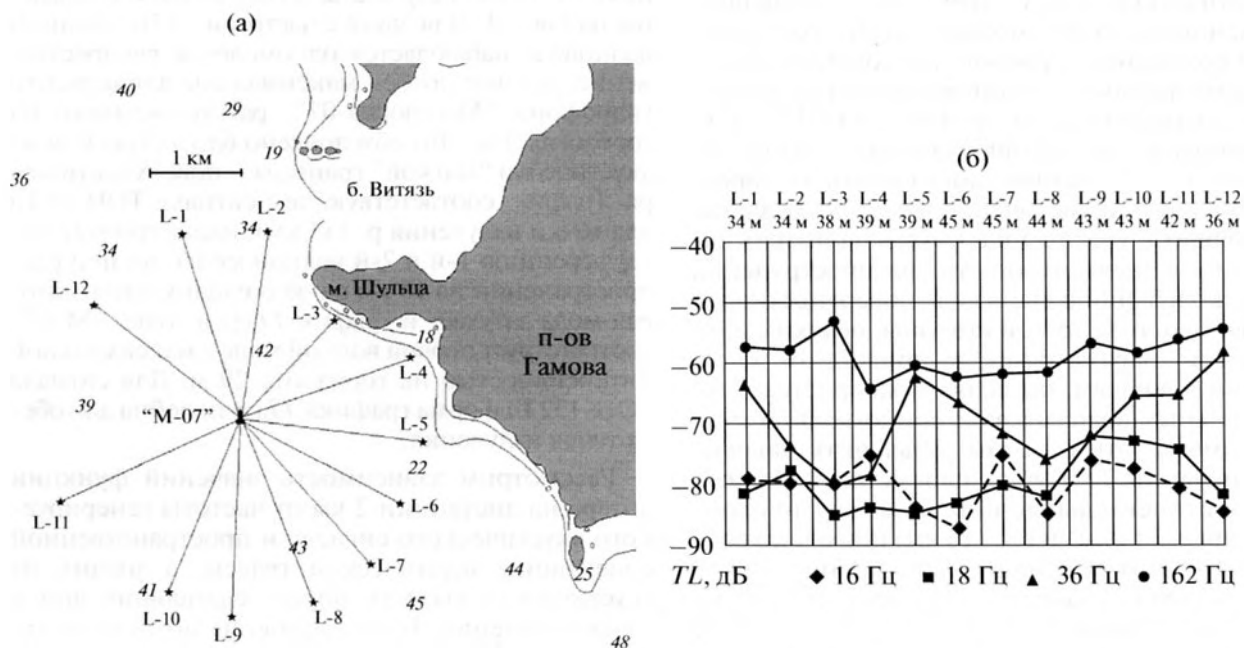


Рис. 12. Схема эксперимента (а) и результаты анализа акустических измерений (б).

от частоты звука, рельефа дна, геометрических параметров водного слоя, геологического строения береговой линии и т.п., по-видимому, результаты данной работы не могут быть корректно экстраполированы на другие шельфы и бухты, но предложенная в этой работе экспериментальная методика их оценки имеет универсальный характер и может быть успешно применена в других районах.

Авторы выражают благодарность С.В. Борисову, В.А. Гриценко, Д.Г. Ковзелью, Р.А. Коротченко и М.Ю. Фершалову за помощь и участие в проведении натурных измерений и анализе данных, а также А.А. Тагильцеву и А.И. Гореликову за консультации и возможность применения в эксперименте оригинального импульсного пневмоизлучателя [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Енсен Ф.Б., Куперман У.А.* Детерминированные модели распространения звука // Подводная акустика и обработка сигналов. Под ред. Л. Бьерна. М.: Мир, 1985. С. 125–134.
2. *Беспалов Л.А., Державин А.И., Кудрявцев О.В. и др.* // Докл. VII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 1998. С. 104–108.
3. *Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkinson 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.
4. *Рутенко А.Н., Расса Р.* Организация и результаты акустического мониторинга во время постановки оснований нефтедобывающих платформ “Лунское” и “ПА-Б” на шельфе о. Сахалин // 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. *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.
7. *Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Воекголт М.* Акустический мониторинг и результаты исследования распространения в прибрежную зону энергии сесморазведочных импульсов // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. 3. С. 356–369.
8. *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.
9. *Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система “Моллюск-07” // *Приборы и техника эксперимента*. 2008. № 5. С. 138–142.
10. *Борисов С.В., Гриценко А.В., Ковзель Д.Г. и др.* Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натурных экспериментах // *Вест. ДВО РАН*. 2003. № 2. С. 16–29.
11. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU 2447658 С2. Российская федерация / Гореликов А.И. – 2010126403/13; заявлено 28.06.2010; опубликовано 20.04.2012.
12. *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. тр. научной конф., посв. 100-летию со дня рождения А.В. Римского-Корсакова. М.: ГЕОС, 2010. С. 173–175.
13. *Круглов М.В., Рутенко А.Н., Расса Р.* Построение экспериментальных оценок уровней акустических шумов на границах районов кормления серых китов во время будущей индустриальной деятельности нефтедобывающих компаний на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Докл. XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 340–343.
14. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 189 с.
15. *Вадов Р.А.* Энергетические характеристики звуковых полей в Черном море // *Акуст. журн.* 1998. Т. 44. № 3. С. 318–325.
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. *Jensen F.V., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H.* Computational ocean acoustics. New York: AIP press, 1994. 612 p.
18. *Коротченко Р.А., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения низкочастотного звука на шельфе // Докл. XII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2009. С. 95–98.