

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В БУХТЕ ВИТЯЗЬ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Д.С. Манульчев, А.Н. Рутенко

Представлены результаты натурных исследований распространения низкочастотного акустического импульсного сигнала в бухте Витязь (залив Посьета, Японское море). Измерения проведены с помощью автономной акустической донной станции, цифровых радиогидроакустических буев и импульсного пневмоизлучателя, свешиваемого с борта катера. Показано, что в бухте Витязь на акустической трассе длиной 2.2 км со средней глубиной 34 м формируется сигнал в виде двух импульсов с соизмеримыми амплитудами и задержкой 0.2 с. Первый импульс формируется за счет водных мод, природа происхождения второго импульса, по-видимому, связана с наличием в бухте осадочного грунта, накапливаемого над коренными породами за счет течений и впадающих в бухту ручьев. Данное предположение подтверждается численным моделированием путем введения в модельный волновод песочно-илистой подложки как канала распространения энергии импульсного сигнала. Для акустической трассы той же протяженностью и с тем же профилем дна, но ориентированной со стороны моря эффекта "двойного импульса" не наблюдается. В этом случае вслед за водным импульсом регистрируются затяжные хвосты как следствие отражения импульса от скалистых берегов и островов Таранцева.

Ключевые слова: шельф, сейсмоакустический импульс, распространение энергии звука, неоднородный геоакустический волновод.

1. Введение

Практическая деятельность людей на шельфе часто сопровождается производственными работами, которые могут увеличивать шумовую нагрузку на прилегающую территорию. Известно, что во время проведения в море сейсморазведочных исследований [1] или забивки свай [2] генерируются низкочастотные сейсмоакустические сигналы, энергия которых распространяется не только в водном слое, но и в осадочных слоях, слагающих дно, и коренных породах. Кроме того, на распространение акустических колебаний в шельфовой зоне могут влиять пространственные неоднородности береговой линии, выступающие мысы и острова, а также слой накапливаемого осадочного грунта, характерный для обособленных водных зон типа бухт. Практический интерес таких исследований представляет возможность прогнози-

рования уровней антропогенных шумов, формируемых в рассматриваемом районе шельфа определенным видом производственной деятельности. Это можно сделать с помощью адаптированной к данному району теоретической модели геоакустического волновода, которая должна учитывать особенности местной батиметрии, гидрологических условий и свойств физико-акустических параметров донных отложений [3].

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных в мае 2013 г. на шельфе Японского моря в районе полуострова Гамова в относительно глубоководной бухте Витязь (залив Посьета). Бухта окружена пологими берегами с песчаными и гравийными пляжами. На выходе из бухты располагаются три небольших скалистых острова Таранцева. Бухта характеризуется сложным рельефом дна с накапливаемым осадочным

слоем, который формируется за счет течений, впадающих в бухту ручьев и дождевых стоков. Целью работы является экспериментальное и численное изучение влияния осадочного грунта, накапливаемого над коренными породами в бухте, на формирование низкочастотного акустического поля.

На рис. 1, а приведена карта района с указанием точки постановки донной станции – R , а также равноудаленных относительно R точек излучения низкочастотного импульсного сигнала: $p.1$ – из бухты и $p.2$ – со стороны моря. Протяженность акустических трасс составляет 2–2.2 км. Глубина моря в точке приема R равна 36 м.

В рассматриваемом эксперименте стационарные измерения вариаций акустического давления у дна проводились в частотном диапазоне 2–2000 Гц с помощью гидрофона типа ГИ-50 и цифрового радиобуя – ЦРБ [4] (рис. 1, б). Акустический низкочастотный импульсный сигнал генерировался пневмоизлучателем [5] (рис. 1, в), свешиваемым с борта дрейфующего катера, на горизонты 5–10 м. Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона ЦРБ, опускаемого с борта катера на глубину источника на удалении около 18 м от пневмоизлучателя. Цифровые радиотелеметрические каналы от ЦРБ, установленного в море, и опорного ЦРБ, расположенного на излучающем катере, принимались на береговом посту, расположенном на мысе Шульца, и синхронно вводились в ЭВМ с помощью АЦП.

2. Натурные измерения и их обработка

В районе точки $p.1$ серия излучений импульсных сигналов была проведена в радиусе 150 м с разных горизонтов 3–10 м. В результате излучаемая акустическая мощность для всех точек была разной. Согласно [6], отношение акустических мощностей при наличии поверхности воды W и в безграничном пространстве W_0 для частоты звука 60 Гц ($\lambda = 24$ м) при расположении источника на горизонте 3 м составляет $W/W_0(z_s = 3 \text{ м}) = 0.36$, на горизонтах 5 и 10 м: $W/W_0(z_s = 5 \text{ м}) = 0.8$ и $W/W_0(z_s = 10 \text{ м}) = 1.17$. При излучении на горизонтах 8 и 10 м происходила максимальная отдача энергии сжатого воздуха пневмоизлучателя в воду, и, как следствие, в точку R приходили импульсы с наибольшей амплитудой. Изменения амплитуды принятых сигналов, наблюдаемых в эксперименте, происходили за счет глубины положения пневмоизлучателя, а не за счет смещения точки излучения. На рис. 2 показаны вариации акустического давления опорного гидрофона (а) и донного гидрофона R (б) при излучении из точки $p.1$ на горизонте 8 м. Из графиков видно, что пиковая амплитуда опорного сигнала превышала значения 400 Па, длительность сигнала составила 0.2 с. В точке R акустический сигнал был принят в виде двух разделенных импульсов с примерно равными амплитудами, не превышающих 10 Па. На некоторых записях после второго импульса наблюдались затяжные “хвосты”.

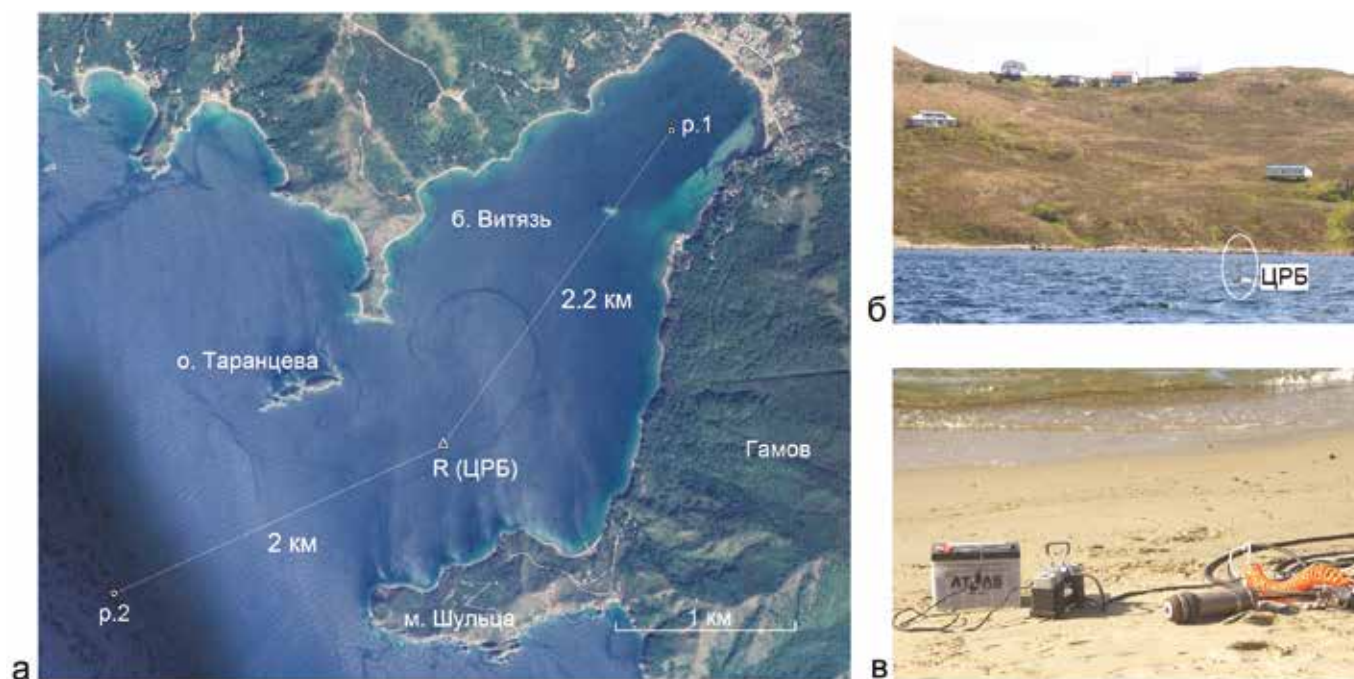


Рис. 1. Спутниковый снимок района бух. Витязь (залив Посыета, Японское море) с указанием точки приема R и точек излучения в бухте $p.1$ и в море $p.2$ (а), фотография поплавка ЦРБ на фоне м. Шульца (б) и пневмоизлучатель (в)

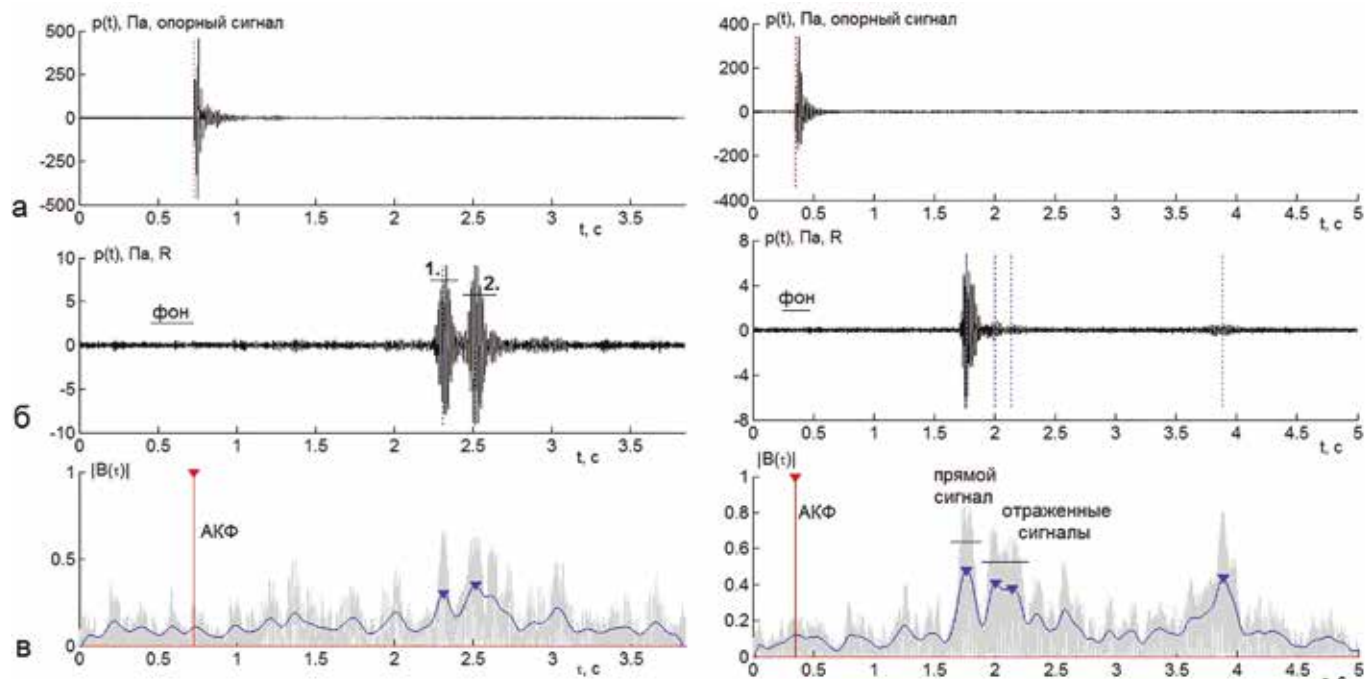


Рис. 2. Опорные сигналы при излучении из точек p.1 и p.2 (а), принятые сигналы в точке R (б), значения модуля нормированной автокорреляционной и взаимной корреляционной функций (в)

Протяженность акустической трассы p.2 – R составляет 2 км. Трасса ориентирована с моря в сторону бухты и имеет небольшой перепад глубин с 33 м в точке источника до 36 м в точке приема R без выраженных неоднородностей батиметрии вдоль трассы. При исследовании распространения импульсного сигнала из точки p.2 эффекта двойного импульса не наблюдалось. На рис. 2 показаны опорный и принятый сигналы при излучении на горизонте 5 м из точки p.2. Во временной области виден прямой импульс с пиковой амплитудой 7 Па и последующие хвосты, пиковая амплитуда которых не превышала 1 Па. Отметим, что показанные на рис. 2 импульсные сигналы были сгенерированы в точках p.1 и p.2 на разных горизонтах, по этой причине пиковая амплитуда импульса в точке p.2 меньше, чем в точке p.1.

Для определения временной задержки между фронтами приходящих импульсов были рассчитаны функции автокорреляции и взаимной корреляции опорного сигнала и сигнала, принятого в точке приема:

$$B(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^T [p_t^{ref} \cdot p_{t+\tau}^R]}{\sqrt{\sum_{t=0}^T (p_t^{ref})^2 \cdot \sum_{t=0}^T (p_{t+\tau}^R)^2}},$$

где p_t^{ref} и p_t^R – значения звукового давления, измеренные опорным гидрофоном вблизи пневмоизлучателя

и в точке приема R соответственно; T – временной интервал опорного импульса. Результат корреляционного анализа для двух акустических трасс показан на рис. 2, в в виде значений функции $|B(\tau)|$ после сглаживания на временном интервале, равном 48 мс. Также отмечены пики корреляционной функции, соответствующие порогу срабатывания “сходства” опорного импульса с принятым сигналом. Для трассы p.2 – R наибольшее значение функции $|B(\tau)|$ соответствует времени прихода “прямого” водного импульса, затем наблюдаются импульсы, которые согласно расчетам являются отражениями, в том числе от островов Таранцева. Последний зафиксированный корреляционной функцией импульс имеет задержку 3.53 с и значение нормированной корреляционной функции, равное 0.8, что говорит о его высокой степени сходства с излученным сигналом.

Наибольший интерес представляет природа разделения импульсов при распространении вдоль бухты низкочастотного сигнала из точки p.1. Корреляционная функция показала, что разность времени прихода первого и второго импульсов составила 0.204 с. Оба импульса имеют почти равные коэффициенты сходства с опорным сигналом и равные пиковые амплитуды акустического давления. На рис. 3 приведены графики спектральной плотности мощности $G(f)$, рассчитанные по данным опорного сигнала, зарегистрированного на расстоянии 18 м от точки излучения p.1, и по временным интервалам 1. и 2.,

показанным на рис. 2, б. Основная энергия генерируемого сигнала приходится на частотный диапазон 40–70 Гц, а также наблюдается энергия колебаний на частотах 80–200 Гц, которая с потерями 30–40 дБ распространяется от $p.1$ до точки приема R . С наименьшими потерями распространяется акустическая энергия в диапазоне частот 50–54 Гц. Заметим, что каждый из разделенных импульсов имеет почти одинаковые уровни спектральной плотности мощности.

Объяснить наличие двух импульсов, формируемых вдоль акустической трассы $p.1 - R$, основываясь на отражении излученного сигнала от берегов бухты Витязь, сложно. Экспериментальные исследования, согласно работе [3], показали, что пространственные неоднородности скалистого берега под водой эффективно отражают звук до 70 Гц и рассеивают на частотах от 100 Гц. Подобное отражение акустических колебаний мы видим при излучении импульсного сигнала из точки $p.2$. Как было сказано выше, бухту Витязь окружают преимущественно пологие берега с песочными и галечными пляжами без выраженных скалистых образований (см. фото на рис. 1, б). Звук на низких частотах, распространяясь в сторону берега, вследствие уменьшения глубины будет затухать, поэтому любые отражения должны приводить к резким уменьшениям амплитуды отраженного импульсного сигнала, что противоречит наблюдениям. Отражение звука от скалистых островов Таранцева также не объясняет разделение импульсов, поскольку в этом случае временная задержка между приходами импульсов должна быть существенно большей. По всей видимости, приход в точку приема разделенных импульсов связан не с отражением звука от какой-либо части берега, а с особенностями стратификации

геоакустического волновода. Наличие между водой и скальными породами подложки из осадочного материала (ил, песок) может сформировать дополнительный канал распространения энергии акустических колебаний, толщина которого будет соизмерима с толщиной водного слоя. Таким образом, на относительно небольших глубинах низкочастотный звук может захватываться водным слоем и в то же время слоем осадков, отражаясь от акустического фундамента (преимущественно гранита) и границы раздела “вода–дно”. Проверим данную гипотезу с помощью численного моделирования.

3. Результаты численного моделирования

Представленные ниже численные расчеты основываются на приближении модового параболического уравнения (МПУ), полученного с помощью метода многомасштабных разложений для слоистой среды с произвольным количеством слоев [7]. Модельные расчеты проводятся в неоднородном 3-D геоакустическом волноводе, в котором, как правило, известны пространственный профиль дна и распределение скорости звука в водном слое. Акустическое поле рассчитывается в вертикальной плоскости с помощью распространяющихся взаимодействующих вертикальных нормальных мод, а в горизонтальной плоскости – в секторе, определяемом узкоугольным параболическим уравнением.

Используемый в расчетах модельный геоакустический волновод имитирует акустическую трассу $p.1 - R$ и представляет собой трехслойную среду (вода – осадочный грунт – слой с твердыми породами) с профилем дна, близким к реальной батиметрии (рис. 4, а). Толщина осадочной подложки уменьшается при удалении от берега. Свойства дна задаются линейным распределением физико-акустических параметров донных пород – скорость продольной волны, плотность грунта и коэффициент затухания. Скорость звука в воде не измерялась, но была оценена по времени прихода водного импульса и данным GPS. Источник звука располагается на горизонте 8 м. Прием акустических колебаний осуществляется в точке R , расположенной вблизи дна (20 см от дна) на горизонте 36 м и на удалении 2.2 км от источника. При моделировании акустического поля расчеты проводятся в адиабатическом приближении первых двух мод, тем самым фактически ограничивая углы распространения лучей. Мы предполагаем, что основная энергия звуковых колебаний распространяется в водном слое и в слое осадочного грунта, который состоит из песка мелкой фракции. Полагаем, что ско-

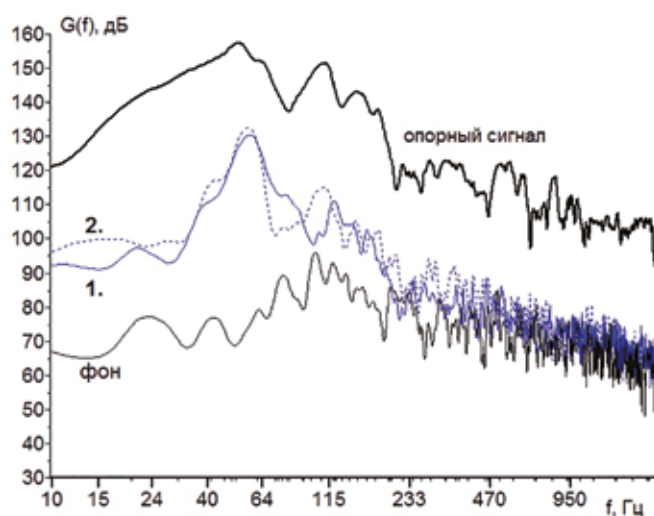


Рис. 3. Спектры акустических сигналов, рассчитанные по опорным измерениям в точке $p.1$ и временным интервалам 1. и 2. принятого сигнала, показанного на рис. 2, б

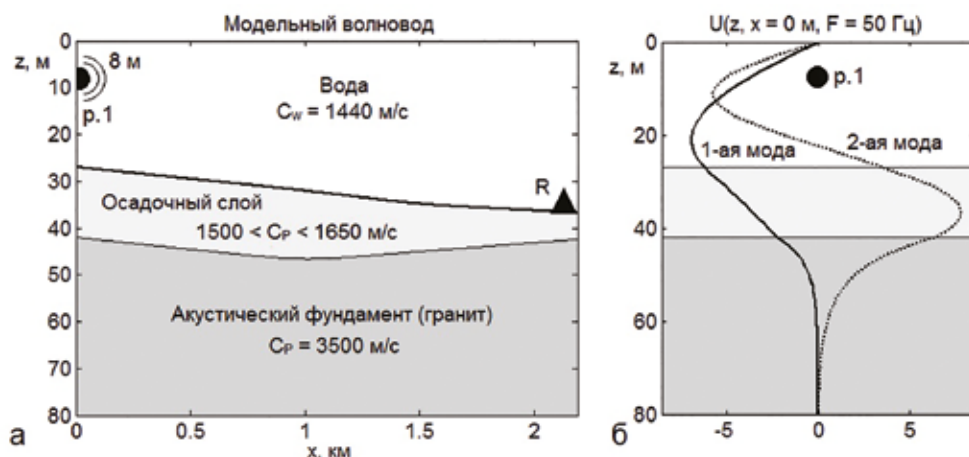


Рис. 4. Стратификация модельного геоакустического волновода (а), первые две модовые функции на частоте звука 50 Гц в точке источника (б)

рость сдвиговых волн в этом слое мала, и слой можно рассматривать в приближении “жидкого” дна. Функция источника строилась путем умножения опорного сигнала на коэффициент, подобранный таким образом, чтобы модельный импульс согласовывался с натурными измерениями в точке опорного гидрофона. Длительность модельного сигнала составляет 1 с.

Построение первых трех модовых функций на частоте звука 50 Гц показали, что первая мода является водной. Вторая мода переносит часть энергии акустических колебаний в воде, но большая часть энергии фокусируется в осадочном слое. Третья мода яв-

ляется донной и уносит часть энергии в нижний слой (гранит). Звук на более низких частотах может рефрагировать благодаря наличию градиента в нижнем слое и возвращаться в воду в виде низкочастотных “предвестников”. Первые две распространяющиеся моды приведены на рис. 4, б.

На рис. 5 приведены результаты численных расчетов. На графиках временной области модельных импульсных сигналов видно, что импульс, рассчитанный в точке приема R в приближении двух мод, имеет форму, похожую на форму экспериментального сигнала. Запаздывание второго импульса от

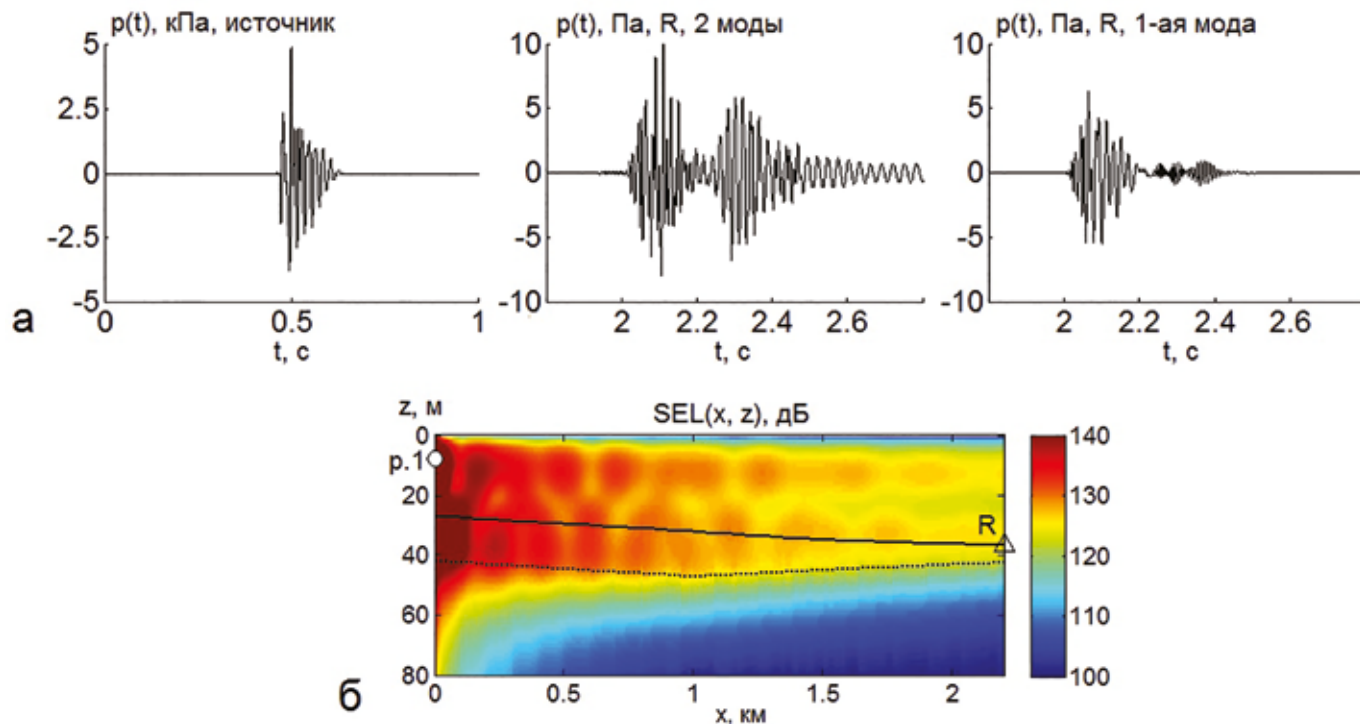


Рис. 5. Модельные импульсные сигналы во временной области в приближении двух и одной мод (а) и пространственное распределение параметра SEL модельного импульсного сигнала в приближении первых двух мод (б)

первого в модельном сигнале составляет 0.21 с (согласно экспериментальным данным – 0.204 с). Время распространения фронта модельного сигнала из точки $p.1$ до R составило 1.54 с. Если в расчетах учитывать только первую моду, то второй импульс, распространяющийся в слое осадков, пропадает, а амплитуда первого импульса уменьшается. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что вторая мода вносит вклад в энергию первого водного импульса и полностью формирует импульс, распространяющийся в слое осадочного грунта. Для оценки энергии акустических колебаний использовался параметр SEL (Sound Exposure Level), рассчитанный по формуле: $SEL = \int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt$, где $t_2 - t_1$ – временной интервал импульсного сигнала. На рис. 5, б приведен график пространственного распределения величины SEL модельного импульса, на котором наблюдается фокусировка энергии акустического колебания в водном слое и в слое осадков.

4. Заключение

Согласно натурным данным при распространении низкочастотного акустического импульсного сигнала вдоль бухты Витязь в сторону моря гидрофоном у дна регистрировался “двойной” импульс с задержкой

0.2 с, оба импульса имели соизмеримые амплитуды и графики спектра. Была выдвинута гипотеза о том, что наличие одного из импульсов объясняется особенностями стратификации волновода, характерного для данной местности. Слой осадочных пород, имеющих толщину, соизмеримую с толщиной водного слоя (рис. 4, а), создает дополнительный канал распространения звука. Звук здесь фокусируется между дном и слоем горных пород, представленных преимущественно гранитом. Как показали модельные расчеты, энергия “прямого” (или водного) импульса переносится первой и частично второй модой, в то время как другой импульс распространяется в слое осадков за счет преимущественно второй моды. Изменение толщины осадочного слоя, а также его физико-акустических параметров позволяет регулировать время задержки между импульсами, а также отношение их амплитуд. Опираясь на экспериментальные данные, можно проводить более точную томографию дна в мелководных бухтах.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ТОИ ДВО РАН «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана» №0211-2021-0001. Авторы выражают благодарность С.В. Борисову, Д.Г. Ковзелью, В.А. Гриценко за участие в натурных экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Erbe C. Underwater noise from pile driving in Moreton Bay, Q1d // Acoustics Australia. 2009. V. 37. No. 3. P. 87–92.
3. Рутенко А. Н., Манульчев Д. С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акуст. журн. 2014. Т. 60, № 4. С. 384–394.
4. Гриценко В.А., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономные измерительные средства для мониторинга фоновых и антропогенных акустических шумов и сигналов на шельфе // Океанологические исследования ДВ морей и северо-западной части Тихого океана: в 2-х т. Владивосток: Дальнаука, 2013. Т. 2. С. 194–212.
5. Пат. RU 2447658 С2. Российская федерация. Экологический генератор отпугивающих звуков / Гореликов А.И. – № 2010126403/13; заявл. 28.06.2010; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 1.
6. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 77–80.
7. 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.

Об авторах

МАНУЛЬЧЕВ Денис Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Научные интересы: Акустика океана, распространение акустических волн, математическое моделирование, программирование

Phone: 8 (950) 298 82 14

E-mail: manulchevds@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-3744-5308

РУТЕНКО Александр Николаевич, д.ф.-м.н.

Для цитирования:

Манульчев Д.С., Рутенко А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В БУХТЕ ВИТЯЗЬ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3(37). С. 90–96. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_09.

STUDY OF PULSE SIGNAL PROPAGATION IN VITYAZ BAY OF SEA OF JAPAN BASED ON EXPERIMENTAL AND MODEL DATA

D.S. Manul'chev, A.N. Rutenko

The work presents the results of field studies of a low-frequency acoustic pulse signal propagation in Vityaz Bay (Posiet Bay, Sea of Japan). Measurements were conducted with an autonomous acoustic bottom station, digital radio hydroacoustic buoys, and a pulsed pneumoemitter moored from a drifting vessel. It is shown that on an acoustic path of 2.2 km long with an average depth of 34 m in Vityaz Bay, a received signal has the form of two pulses with comparable amplitudes and a delay of 0.2 s. Water modes form the first pulse. Apparently, the nature of the second pulse is associated with the presence of sedimentary soil in the bay, accumulated over bedrocks due to currents and streams flowing into the bay. This assumption is confirmed by numerical simulation by introducing a sandy-silty substrate into the model waveguide as a pulse energy signal propagation channel. For an acoustic path of the same length and bottom profile but directed on the shore, the "double pulse" effect is not observed. In this case, protracted tails are recorded behind the water pulse due to the reflection of the water pulse from the rocky shores and the Tarantsev Islands.

Keywords: shelf, seismoacoustic pulse, sound energy propagation, inhomogeneous geoacoustic waveguide.

References

1. Rutenko A.N., Borovoy D.I., Gritsenko V.A., Petrov P.S., Ushchipovsky V.G., Boekholt M. Acoustic monitoring and research results of the seismic pulse energy propagation into the coastal zone. *Acoust. Phys.* 58 (2012), Vol. 58. No. 3. P. 356–369.
2. Erbe C. 2009. Underwater noise from pile driving in Moreton Bay, Qld. *Acoustics Australia* 37(3), 87–92.
3. Rutenko A.N., Manulchev D.S. Propagation of low-frequency waves through Cape Shultz. *Acoust. Phys.* 60 (2014), No. 4. P. 384–394.
4. Gritsenko V.A., Kovzel D.G., Rutenko A.N., Ushchipovsky V.G. Autonomous measuring instruments for monitoring background and anthropogenic acoustic noise and signals on the shelf. *Oceanological studies of the Far East of the seas and the north-western part of the Pacific Ocean: in 2 books.* Vladivostok, Dalnauka. 2013. Vol. 2. P. 194–212.
5. Gorelikov A.I. RFPatent 2447658 (2012).
6. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. *Theoretical Fundamentals of Ocean Acoustics.* Leningrad, Gidrometeoizdat. 1982. P. 77–80.
7. 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.

About the authors

MANUL'CHEV Denis Sergeevich

Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS

Address: 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A.

Research interests: Ocean acoustics, acoustic wave propagation, numerical simulation, programming

Phone: +7 (950) 298 82 14

E-mail: manulchevds@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-3744-5308

RUTENKO Alexander Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Recommended citation:

Manul'chev D.S., Rutenko A.N. STUDY OF PULSE SIGNAL PROPAGATION IN VITYAZ BAY OF SEA OF JAPAN BASED ON EXPERIMENTAL AND MODEL DATA. *Underwater investigation and robotics.* 2021. No. 3(37). P. 90–96. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_09.