

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В БУХТЕ ВИТЯЗЬ

**Манульчев Д.С.**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН*

E-mail: manulchevds@gmail.com

### **Аннотация**

Представлены результаты натурных исследований распространения низкочастотного акустического импульсного сигнала в бухте Витязь, Японское море. Измерения были проведены с помощью цифровых радиогидроакустических буев и импульсного пневмоизлучателя, свешиваемого с борта катера. Показано, что на трассе длиной 2,2 км со средней глубиной 30 м формируется сигнал в виде двух импульсов с соизмеримыми амплитудами и с задержкой 0,19 с, что, по-видимому, связано с наличием накопленного в бухте осадочно-го слоя. Данное предположение подтверждается численным моделированием путем введения в модельный волновод песочно-илистой подложки как канала распространения энергии импульсного сигнала.

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

## ENERGY PROPAGATION OF THE LOW-FREQUENCY PULSE ENERGY IN VITYAZ BAY

**Manul'chev D.S.**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch  
of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: manulchevds@gmail.com

### **Abstract**

The paper presents the results of field studies on the propagation of a low-frequency acoustic pulse signal in Vityaz Bay, Japanese Sea. The measurements were carried out using digital radio-acoustic buoys and a pulsed air emitter hanging from the side of the boat. It was shown that on a 2.2 km long path with an average depth of 30 m, a signal is formed in the form of two pulses with comparable amplitudes and with a delay of 0.19 s, which is apparently due to the presence of a sedimentary layer accumulated in the bay. This assumption is confirmed

by numerical simulation by introducing into the model waveguide a sandy-silty substrate as a pulse energy signal propagation channel.

*Keywords:* seismoacoustic pulse, sound energy propagation, inhomogeneous geoaoustic waveguide.

## **Введение**

Практическая деятельность людей на шельфе часто сопровождается шумовым загрязнением моря. Причиной тому могут служить взрывы от сейсмопушек при сейсморазведке месторождений нефти и газа, установки газонефтедобывающих платформ и их обслуживания, а также строительные работы, сопровождаемые, например, забивкой фундаментных свай на берегу. Подобное антропогенное акустическое воздействие может отпугивать морских животных от привычных для них мест обитания, кормежки и отдыха. Таким образом, освоение шельфа обосновывает актуальность изучения распространения низкочастотных акустических колебаний в море и на берегу.

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. Сложный рельеф дна, а также накапливаемый осадочный слой, который формируется преимущественно за счет выпадающих в бухту ручьев и дождевых стоков, могут оказывать влияние на распространение энергии низкочастотных сейсмоакустических сигналов. Целью работы является экспериментальное и модельное изучение влияний неоднородностей геоакустического волновода, характерного для шельфа, на формирование низкочастотного акустического поля.

Бухта Витязь окружена пологими берегами с песчаными и гравийными пляжами. На выходе из бухты располагаются три небольших скалистых острова Таранцева. На рис. 1 приведена карта района с указанием точки постановки донной станции – R, а также точек излучения низкочастотного импульсного сигнала р.1 – р.6. Акустическая трасса ориентирована вдоль бухты в сторону ее выхода. Расстояние от самой удаленной точки излучения до точки R достигало 2,3 км. Глубина моря в точке приема R составляла 36 м.

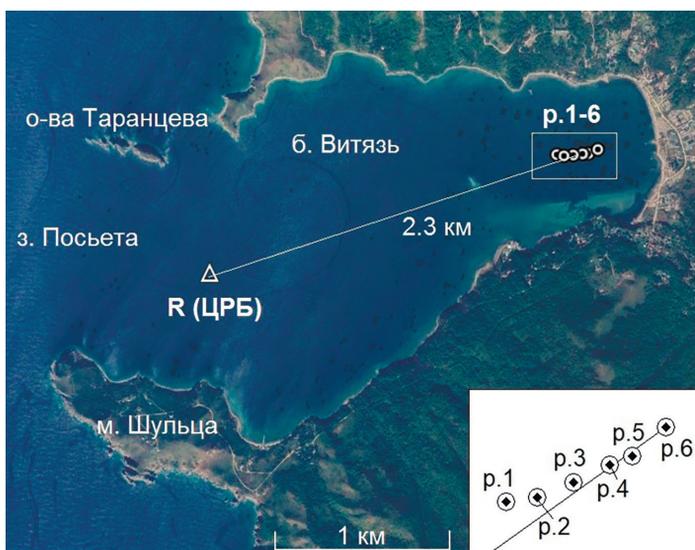


Рис. 1. Карта района б. Витязь (залив Посьета, Японское море) с указанием точки приема R и точек излучения р.1–р.6

## Измерительно-регистрационный комплекс

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 [2]. Акустический низкочастотный импульсный сигнал генерировался пневмоизлучателем [4], свешиваемым с борта дрейфующего катера. Опорные акустические измерения проводились с помощью гидрофона ЦРБ, опускаемого с борта катера на глубины 3–10 м на удалении  $\approx 18$  м от пневмоизлучателя. Цифровые радиотелеметрические каналы от ЦРБ, установленного в море, и опорного ЦРБ, расположенного на излучающем катере, принимались на береговом посту и синхронно вводились в ЭВМ с помощью АЦП.

## Результаты натуральных измерений

Излучение низкочастотных акустических импульсов производилось последовательно из точек р.1 – р.6. Амплитуда опорного сигнала

(18 м от излучателя) достигала значения 400 Па с длительностью импульса 0,2 с. Временная развертка принятых в точке R акустических сигналов показана на рис. 2. Видно, что принятый сигнал состоит из двух разделенных импульсов с примерно равными амплитудами, не превышающих 10 Па. На некоторых записях после второго импульса наблюдаются затяжные «хвосты». Отметим, что акустические импульсы генерировались на разных горизонтах (3, 5, 6, 8 и 10 м), поэтому формируемая пневмоизлучателем акустическая мощность была разной. Согласно [1], отношение акустических мощностей при наличии поверхности воды и в безграничном пространстве для частоты звука 60 Гц ( $\lambda = 24$  м) при расположении источника на горизонте 3 м составляет  $\frac{W}{W_0}(z_s = 3\text{ м}) = 0.36$ , на горизонтах 5 м и 10 м соответственно  $\frac{W}{W_0}(z_s = 5\text{ м}) = 0.8$  и  $\frac{W}{W_0}(z_s = 10\text{ м}) = 1.17$ . При расположении источника на глубинах 8 м в точке p.3 и 10 м в точке p.6 происходила максимальная отдача энергии сжатого воздуха пневмоизлучателя в воду, и как следствие в точку R приходили импульсы с наибольшей амплитудой. Наименьшую амплитуду имел сигнал, сгенерированный

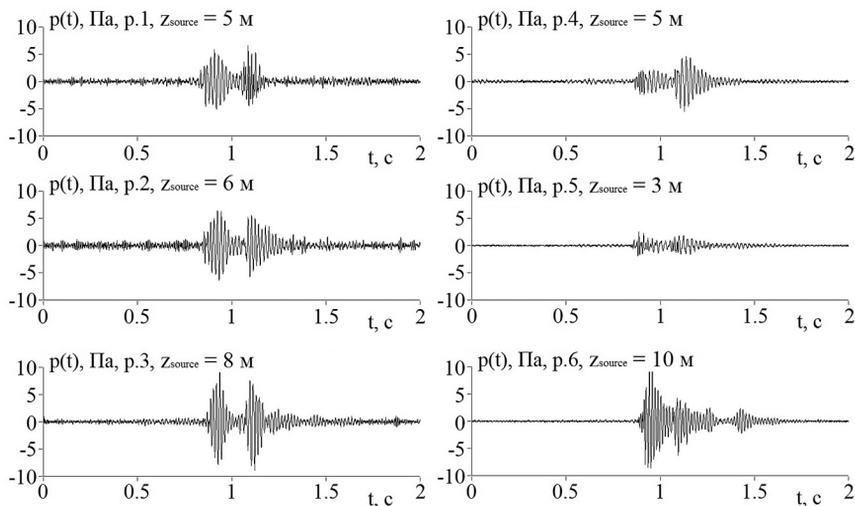


Рис. 2. Принятые в точке R импульсные сигналы при их излучении на различных горизонтах в точках p.1–p.6

на горизонте 3 м в точке р.5. Таким образом, амплитуда принятых сигналов меняется за счет глубины положения пневмоизлучателя, а не за счет пространственного перемещения точки излучения.

Наибольший интерес представляет природа разделения импульсов в принятых сигналах. На рис. 3 показаны опорный импульс на удалении около 18 м от источника и сигнал, принятый в точке р.1, а также их спектры. Спектральный анализ двойного импульса (на рис. 3 импульс разделен на две реализации 1. и 2.) показал, что уровни спектральной плотности мощности импульсов отличаются незначительно. Согласно графику  $G(f)$  (рис. 3б) основная энергия генерируемого сигнала приходится на частотный диапазон 40–70 Гц. В опорном импульсе наблюдается также энергия на частотах 80–200 Гц, которая, однако, с потерями 30–40 дБ распространяется до точки R. С наименьшими потерями распространяется энергия в диапазоне частот 50–54 Гц.

Для определения временной задержки между двумя импульсами по методике, представленной в работе [3], была рассчитана функция взаимной корреляции опорного сигнала и сигнала, принятого в точке приема. На рис. 3 представлен график модуля взаимной корреляционной функции и ее огибающей. Также отмечены пики

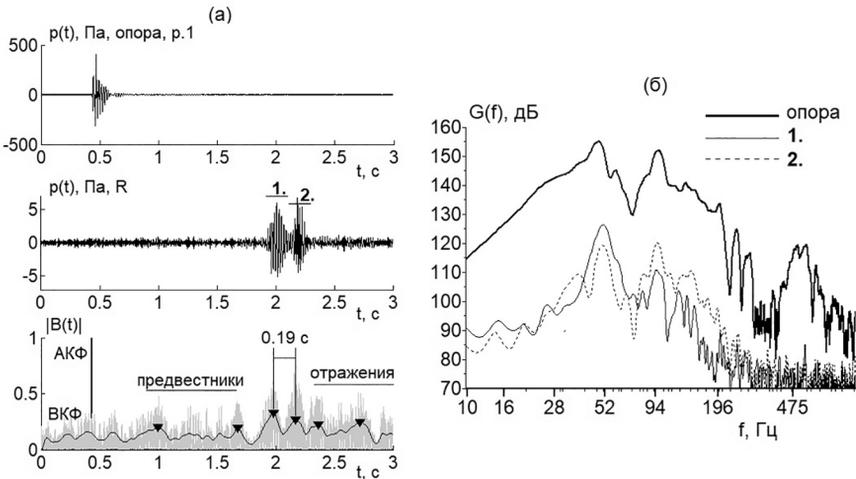


Рис. 3. Опорный сигнал и сигнал, полученный в точке приемника R при излучении из точки р.1: а) – значения модуля нормированной взаимной корреляционной функции  $B(t)$ ; б) – спектры акустических сигналов, соответствующие временным интервалам 1 и 2

функции, соответствующие порогу срабатывания «сходства» опорного импульса с принятым сигналом. Из графика корреляционной функции видно, что часть акустической энергии распространяется с высокими скоростями в скальных породах, слагающих дно, и с большими потерями приходит в точку R (предвестники). Затем гидрофон регистрирует два разделенных импульса, одним из которых является «прямой» импульс, энергия которого переносится водной модой (модами). Разность времени прихода первого и второго импульса составила 0,19 с. Если принять, что скорость звука в воде равна 1440 м/с, то путь распространения второго импульса должен быть больше первого на 273 м.

Объяснить наличие двух импульсов, основываясь на отражении излученного сигнала от берегов бухты Витязь, сложно. Как было сказано выше, бухту Витязь окружают преимущественно пологие берега с песочными и галечными пляжами. Низкочастотный звук, распространяясь в сторону берега, вследствие уменьшения глубины будет затухать, поэтому любые отражения должны приводить к резким уменьшениям амплитуды отраженного импульсного сигнала, что противоречит наблюдениям. В работе [3] было показано, что при распространении акустического импульса вдоль скалистого берега звук эффективно отражается на частотах до 100 Гц. Отражение звука от 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 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 малых глубинах низкочастотный звук может захватываться водным слоем и в то же время слоем осадков, отражаясь от акустического фундамента (преимущественно гранита) и границей раздела «вода – дно». Проверим данную гипотезу с помощью численного моделирования.

## Результаты численного моделирования

Представленные ниже теоретические расчеты основываются на приближении модового параболического уравнения (МПУ), полученного с помощью метода многомасштабных разложений для слоистой среды с произвольным количеством слоев [5]. Модельные расчеты проводятся в неоднородном 3D-геоакустическом волноводе, в котором, как правило, известен 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.

Пусть модельный геоакустический волновод представляет собой трехслойную среду (вода – осадочный слой – дно) с профилем дна, близким к реальной батиметрии (рис. 4). Толщина осадочной подложки уменьшается при удалении от берега. Свойства дна задаются линейным распределением физико-акустических параметров донных пород – скорость звука продольной волны, плотность грунта и коэффициент затухания. Источник звука располагается на горизонте 8 м. Прием акустических колебаний осуществляется в точке R, расположенной вблизи дна на горизонте 36 м и на удалении 2,2 км от источника. Упругие свойства пород дна при расчетах не учитываются. Расчеты

проводятся в адиабатическом приближении. Функция источника строилась путем умножения опорного сигнала на коэффициент, равный 3.5. Длительность модельного сигнала составляет 1 с.

Построение первых трехмодовых функций на частоте звука 50 Гц показало, что первая мода

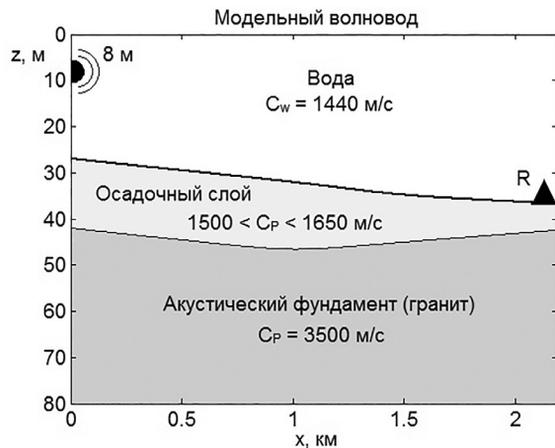


Рис. 4. Стратификация модельного геоакустического волновода

является водной. Вторая мода переносит часть энергии акустических колебаний в воде, но большая часть энергии фокусируется в осадочном слое. Третья мода является донной и уносит часть энергии в третий слой (гранит). Звук на более низких частотах реагирует благодаря наличию градиента в нижнем слое и возвращается в воду в виде низкочастотных «предвестников». Первые две распространяющиеся моды приведены на рис. 5а.

Результаты численных расчетов представлены на рис. 5–6. На рис. 5б видно, что модельный импульсный сигнал, рассчитанный в приближении двух мод, имеет форму, похожую на форму экспериментального сигнала. Запаздывание второго импульса от первого в модельном сигнале составляет 0,2 с (согласно экспериментальным данным – 0,19 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 запаздывающий импульс,

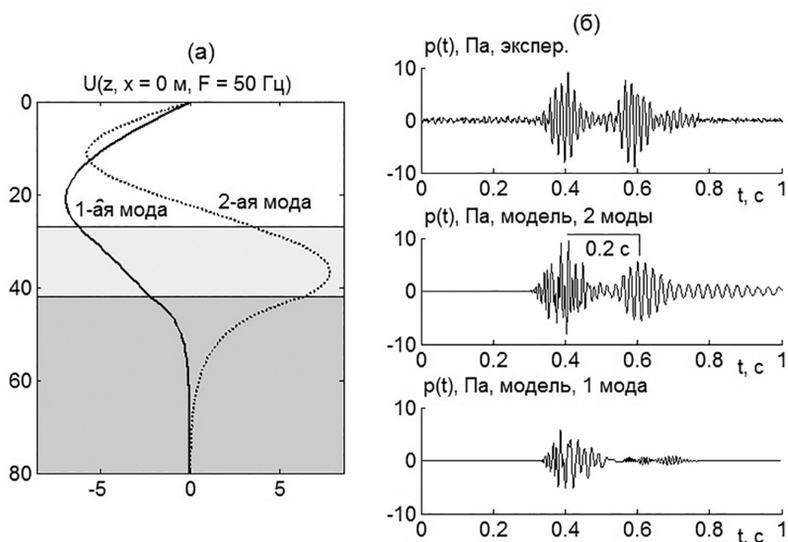


Рис. 5. а) первые две модовые функции на частоте звука 50 Гц в точке источника; б) экспериментальный и соответствующие ему модельные импульсные сигналы во временной области в приближении двух и одной мод

распространяющийся с групповой скоростью меньшей, чем водный импульс. На рис. 6 приведен график пространственного распределения величины  $SEL$  (уровень акустической экспозиции) модельного импульса, на котором наблюдается фокусировка энергии акустического колебания в водном слое и в слое осадков.

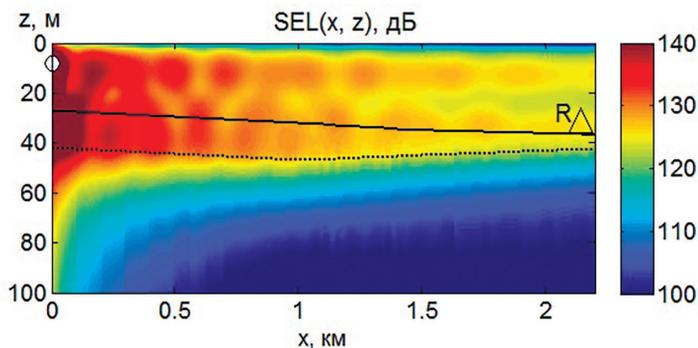


Рис. 6. Пространственное распределение параметра  $SEL$  модельного импульсного сигнала

## Заключение

Согласно натурным данным при распространении низкочастотного акустического импульсного сигнала вдоль бухты Витязь в сторону моря гидрофоном у дна регистрировался «двойной» импульс с задержкой 0,19 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), 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. Поскольку групповая скорость первой моды на частотах 50–54 Гц больше скорости второй моды, то первым регистрируется водный импульс. 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.

**Благодарность.** Автор выражает благодарность Рутенко А.Н., Борисову С.В., Ковзелью Д.Г., Гриценко В.А. за участие в натуральных экспериментах.

## Литература

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана // Ленинград. Гидрометеиздат. 1982. С. 77–80.
2. 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.
3. Рутенко А.Н., Манульчев Д.С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 384–394.
4. Экологический генератор отпугивающих звуков. Пат. RU2447658 С2. Российская Федерация / Гореликов А.И. 2010126403/13; заявлено 28.06.2010; опубликовано 20.04.2012.
5. 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.

## References

1. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical Foundations of Ocean Acoustics // Leningrad, Gidrometeoizdat. 1982. P. 77–80.
2. Kovzel D.G., Rutenko A.N. Autonomous acoustic station with digital radio telemetry channel for monitoring seismic-acoustic signals on the shelf // Instruments and experimental technique. 2009. No.6. P. 102–106.
3. Rutenko A.N., Manulchev D.S. Propagation of low-frequency waves through Cape Schulz // Acoust. Phys. 2014. V. 60. No. 4. P. 384–394.
4. Ecological generator of scaring sounds. Pat. RU2447658 C2. Russian Federation / Gorelikov A.I. 2010126403/13; claimed June 28, 2010; published on April 20, 2012.
5. 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.