

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ  
ЯПОНСКОГО МОРЯ (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО)

**А.Н. Самченко\***, **А.А. Пивоваров**, **А.Н. Швырев**,  
**И.О. Ярошук**

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

E-mail: \*samchenco@poi.dvo.ru

**Аннотация**

В статье обсуждаются результаты экспериментальных работ, проведенных в осенний период 2016 и 2017 гг. в заливе Петра Великого Японского моря. В экспериментах использовались низкочастотные гидроакустические излучатели с центральной несущей частотой 22 и 33 Гц и гидроакустического излучателя с центральной несущей частотой 240 Гц, прием сигналов осуществлялся на автономные гидроакустические станции (АГС), синхронизированные по времени. Акустические исследования проводились совместно с гидрологическими измерениями СТД-зондом и заякоренными автономными термогирляндами. На основе результатов гидроакустических экспериментов, где использовались гидроакустические излучатели 22 и 33 Гц, показана возможность решения как обратных задач, так и геоакустической инверсии. Полученные в результате измерений групповые скорости различных мод позволяют провести оценки геоакустических свойств дна. Экспериментально показано, что на распространение сигналов с частотами более 200 Гц вдоль акустической трассы сильное влияние оказывает гидрология.

*Ключевые слова:* Гидроакустика, геоакустическая модель, низкочастотный гидроакустический излучатель, залив Петра Великого.

LOW-FREQUENCY EXPERIMENTAL ACOUSTIC RESEARCH  
ON THE SHELF OF THE SEA OF JAPAN  
(PETER THE GREAT BAY)

**A.N. Samchenko\***, **A.A. Pivovarov**, **A.N. Shvyrev**,  
**I.O. Yaroshchuk**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian  
Academy of Sciences, Vladivostok  
E-mail: \*samchenko@poi.dvo.ru*

**Abstract**

The paper discusses the results of experimental work carried out in the autumn period of 2016 and 2017 in Peter the Great Bay of the Sea of Japan. We used low-frequency hydroacoustic emitters with a central carrier frequency of 22 and 33 Hz and a hydroacoustic emitter with a central carrier frequency of 240 Hz. The signals were registered at autonomous hydroacoustic stations (AHS) and were synchronized in time. Acoustic studies were supplemented with hydrological measurements obtained from CTD probe and moored autonomous therostrings. The possibility of solving both inverse problems and geoacoustic inversion problems was shown basing on the results of hydroacoustic experiments by means of the hydroacoustic emitters at 22 and 33 Hz. The group velocities of different modes obtained as a result of measurements allowed us to estimate the geoacoustic properties of the bottom. It was experimentally proved that the propagation of signals with frequencies greater than 200 Hz along the acoustic path is strongly influenced by hydrology.

*Keywords:* Hydroacoustic, geoacoustic model, low-frequency hydroacoustic radiator, Peter the Great Bay.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5184-0718>

**Введение**

Гидроакустические экспериментальные работы проводятся в заливе Петра Великого лабораторией статистической гидроакустики ТОИ ДВО РАН в комплексе с изучением гидрологической ситуации и геоакустических свойств дна более 10 лет. Гидрологические работы проводятся с 2009 года [5]. Создана геоакустическая модель залива Петра Великого [1, 3]. В экспериментах используются низко-

частотные гидроакустические излучатели 22 Гц, 33 Гц, 230-250 Гц, 310-340 Гц и 420-520 Гц и автономные донные акустические станции (АГС) в качестве приемных систем [1, 2]. Акустические исследования на шельфе сопровождаются гидрологическими измерениями гидрофизических процессов в водной толще. Мониторинг осуществляется пространственно-распределенным гидрологическим комплексом [3]. Система состоит из автономных регистраторов температуры и/или гидростатического давления.

Решались следующие задачи:

1. Изучение распространения низкочастотных акустических сигналов на океаническом шельфе;
2. Статистическое оценивание подводных сигналов на фоне шумов моря

## **Обсуждение результатов**

Рассмотрим примеры решения первой задачи с помощью экспериментальных гидроакустических работ, проведенных в октябре 2016 и октябре 2017 года (рис. 1). В 2016 году использовался гидроакустический излучатель 22 Гц и семь автономных донных акустических станций. Акустические станции были расставлены в одном км друг от друга по трассе от мыса Шульца до о. Фуругельма. Приемные акустические станции устанавливались на дно таким образом, что расстояние от дна до гидрофона было 0.5 м для каждой из систем. Гидроакустический излучатель опускался на глубину 15 м от поверхности воды. Всего в ходе данного эксперимента было выполнено пять станций излучения на расстоянии двух километров друг от друга. Глубина моря вдоль всей акустической трассы примерно равна 40 м, с вариациями не более 2 м. Гидроакустический эксперимент сопровождался измерениями параметров морской воды при помощи заякоренных вертикальных термогирлянд и гидрологического зонда RBRconcerto. Гидрологические стационарные станции показаны на рис. 1 треугольниками. Измерения гидрологическим зондом проводилось от поверхности до дна в каждой точке излучения акустических сигналов и постановки акустических приемных систем. В работе применялись тональные и фазоманипулированные М-последовательностями сигналы. Излучение и прием акустических сигналов осуществлялся с измерением точного времени с помощью системы синхронизации.

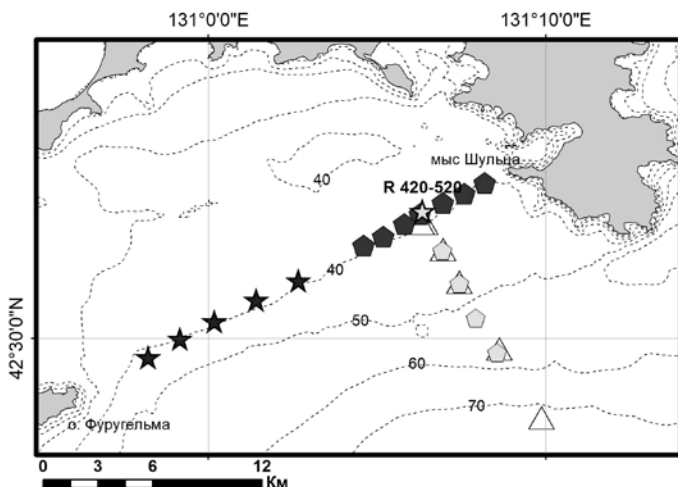


Рис. 1. Схема акустических экспериментов, проведенных в 2016 и 2017 гг. Звездочками показаны точки излучения, пятиугольники – точки постановки акустических станций, треугольники – точки постановки гидрологических станций. Темные значки соответствуют эксперименту, проведенного в 2016 г, и светлые – эксперимент 2017 г.

На рис. 2 показаны максимумы корреляционной функции принятых сигналов частотой 22 Гц на акустических донных станциях. Приемные акустические станции были расположены на расстоянии в 11, 13 и 15 км от точки излучения. Излучение сигналов проводилось вблизи о. Фуругельма. На всех приемных системах зафиксировано два прихода акустического сигнала, рассчитаны их групповые скорости. В геоакустической модели на акустической трассе выделено три осадочных слоя и акустический фундамент, состоящий из гранитов. Верхние два осадочных слоя, состоящих из средне-мелкозернистых песков, имеют близкие акустические свойства. Средняя скорость продольных волн в первом осадочном слое равна 1700 м/с, во втором – 1850 м/с. Третий осадочный слой состоит из крупно обломочного гранитного материала, гальки и крупно-среднезернистого песка по акустическим свойствам резко отличается от верхних слоев. Средняя скорость продольной волны в третьем слое равна 3000 м/с. По всей видимости, граница между верхними двумя осадочными слоями с близкими акустическими свойствами для низкочастотных акустических сигналов является акустически «прозрачной», что показывают результаты гидроакустических экспериментальных работ. Отчетливо

видно на рис. 2, что соотношение энергетики принятых сигналов меняется в зависимости от их групповой скорости. В результате проведенного в 2016 году эксперимента получены следующие выводы: первый - каналом распространения столь низкочастотных сигналов является водный слой и рыхлые донные отложения до консолидированного фундамента. Второй - продемонстрирована принципиальная возможность решения обратных задач: определения числа и мощности осадочных слоев (по положению и ширине главного максимума корреляционной функции и по скорости распространения отраженных волн) и расчета скорости звука в осадочных слоях и фундаменте (по скорости распространения боковых волн). Третий - гидрологическая ситуация на распространение низкочастотного сигнала (ниже 100 Гц) влияет слабо.

В эксперименте, проведенном в 2017 г, использовался гидроакустический излучатель и четыре приемные акустические системы. Гидроакустический излучатель имеет частотный диапазон излучения от 420 Гц до 520 Гц, устанавливается на дно длительностью до 72 часов. В эксперименте глубина моря в месте расположения излучателя была 40 м, приемные системы устанавливались на глубинах от 45 м (ближняя) до 58 м (дальняя). Всего было установлено пять приемных акустических станций. В эксперименте использовались частот-

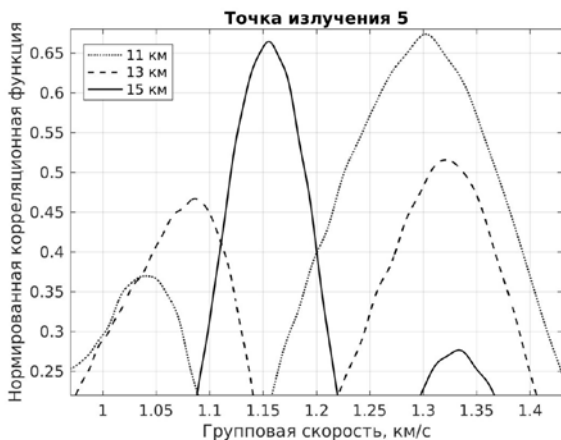


Рис. 2. Главные максимумы корреляционных функций для частоты 22 Гц (октябрь 2016 г.). Точка излучения 5, точки приема в 11, 13 и 15 км от точки излучения.

но-модулированные сигналы с изменением частоты во всей полосе частот излучателя и в тональном режиме на центральной частоте излучателя. Акустический эксперимент также сопровождался гидрологическими измерениями с помощью заякоренных вертикальных термогирлянд (на рис. 1 показаны треугольниками) и гидрологического зонда RBRconcerto. Измерения гидрологическим зондом проводились в точках установки вертикальных термогирлянд, акустических приемников и в точках излучения. Основной вывод, полученный в ходе эксперимента, связан с полученными данными гидрологических измерений. Методика гидрологических исследований позволила детально проследить и проанализировать пространственную и временную изменчивость внутренних гравитационных волн при движении последних со стороны кромки к берегу. Она позволила увидеть процесс трансформации и распада интенсивных волн. Интенсивные волновые возмущения, генерируемые приливом в районе свала глубин залива Петра Великого, сильно нелинейны и испытывают значительные изменения при движении к берегу. Уединенные гидрологические возмущения на изобатах 100 – 40 м трансформируются в пакет короткопериодных интенсивных внутренних гравитационных волн, временные масштабы которых составляют от нескольких до десятков минут. Амплитуда данных возмущений достигает десятки метров по глубине. Короткопериодные гидрологические возмущения имеют сильное влияние на распространение акустических сигналов. Колебания амплитуды принятых сигналов на акустических станциях достигает десяти и более Дб при прохождении интенсивных внутренних гравитационных волн.

В рамках решения проблемы статистического оценивания подводных сигналов на фоне шумов моря был проведен ряд гидроакустических экспериментов в заливе Петра Великого. Например, в августе 2017 г проводился гидроакустический эксперимент с применением 230-250 Гц гидроакустического излучателя. Излучатель опускался на глубину 5 и 10 м. В качестве приемных систем были установлены автономные донные акустические станции. Всего установлено было 4 приемные акустические системы в центре залива Посьета, расположенные параллельно трассе излучения. Расстояние между приемными системами составило примерно 1 км, расстояние от точек излучения до приема составило более 5 км. Максимальное расстояние между точками излучения и приема около 9 км. Глубины места про-

ведения работ колеблются от 36 до 42 м. В работе использовались тональные сигналы 240 Гц и фазоманипулированные М-последовательности. Акустические сигналы излучались различной мощности, минимум излучения был около 1 кПа на одном метре от излучателя. Гидрологические измерения проводились в том же формате и объеме, как и в ранее описанных гидроакустических экспериментах. Гидрология оказывает огромное влияние на распространение сигнала 240 Гц и учитывалась при обработке и анализе данных. По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы: на расстояниях порядка 9 км однозначно фиксируются излученные сигналы, даже малой мощности, на всех приемных акустических станциях. Используя геометрию расставленных приемных систем, со всех точек излучения были получены необходимые параметры (расстояния и углы приходов сигналов).

## **Заключение**

На основе результатов гидроакустических экспериментов на частотах ниже 100 Гц продемонстрирована принципиальная возможность решения как обратных задач, так и геоакустической инверсии. Полученные в результате измерений групповые скорости различных мод позволяют провести оценки геоакустических свойств дна. При проведении измерений на более мелкой сетке (излучение и прием через ~ 100 – 500 метров) возможно создание методики детального восстановления структуры осадочных слоев.

Влияние гидрологии на распространение акустических сигналов различной частоты хорошо известно. Однако нами исследована региональная специфика гидрофизических процессов и их влияние на распространение не только тональных сигналов, но и фазоманипулированных, и частотно-модулированных сигналов. Методика проведения экспериментальных работ, используемая авторами, позволила также решить задачи статистического оценивания подводных сигналов на фоне шумов моря в заливе Петра Великого.

## Литература

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19-26 Гц // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 137-141.
2. Леонтьев А. П., Пивоваров А. А. Автономная приемная двухканальная гидроакустическая станция // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 144–145.
3. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В. и др. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128-135.
4. Самченко А.Н. Геоакустическое моделирование на шельфе с помощью геоинформационных систем // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 4. С. 131-138.
5. Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Кошелева А.В. Результаты гидрологических и геолого-геофизических исследований залива Посьета // Подводные исследования и робототехника. Дальнаука, 2011. № 1 (11). С. 64-68.
6. Самченко А.Н., Ярошук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // Вестник ДВО РАН. 2017. № 5. С. 130-136.

## References

1. Dolgikh, G.I., G.I., Dolgikh, S.G., Pivovarov, A.A. et al. A hydroacoustic system that radiates at frequencies of 19–26 Hz. Instruments and Experimental Techniques. 2017. Vol. 60. № 4. P 596–599. DOI: 10.1134/S0020441217030186.
2. Leontyev A.P., Pivovarov A.A. Measuring autonomic two-channal hydroacoustic station. Instruments and Experimental Techniques. 2013. № 1. P. 144.
3. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V. et al. A spatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf. Instruments and Experimental Techniques. 2017. Vol. 60. № 1. P. 130-136. DOI: 10.1134/S0020441216060191
4. Samchenko A.N. The offshore geoacoustic simulation using geoinformation systems. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2017. № 4. P. 131-138. (In Russ).
5. Samchenko A.N., Pivovarov A.A., Kosheleva A.V. The results of the hydrological and geological and geophysical studies of the Gulf Pos'eta. Underwater research and robotics. 2011(11). № 1. P. 64–68. (In Russian).
6. Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. Acoustic parameters of friable bottom sediments of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan. Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2017. № 5. P. 130–136. (In Russian).