

Экспериментальное выявление особенностей распространения звука в мелком водоеме с помощью системы четырех вертикальных антенн

К. В. Дмитриев, А. С. Липавский, И. А. Панков, С. Н. Сергеев, Е. В. Фадеев*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Проведен эксперимент по распространению звука в мелком природном водоеме в условиях, когда его поверхность покрыта слоем льда. Прием велся синхронно с помощью четырех вертикальных антенн, расположенных на различных расстояниях от источника. Обнаружены волны, распространяющиеся как в слое воды, так и по дну водоема и определены их скорости.

PACS: 43.35.+d, 43.30.+m, 43.60.+d.

УДК: 534.8, 519.24.

Ключевые слова: подводная акустика, акустика мелкого моря, скорость звука.

В последнее время наблюдается существенный рост интереса к исследованиям мелких акваторий, в первую очередь, арктических, в связи с перспективами поиска углеводородов в шельфовой зоне. При этом хорошо изучены вопросы распространения звука в глубоком океане в условиях формирования подводного звукового канала [1, 2]. Проведение полномасштабного эксперимента в таких условиях оказывается достаточно дорогим, поскольку требует участия исследовательских судов и дорогостоящего оборудования, а также зависит от погодных и климатических условий. Нами был проведен натурный эксперимент по изучению распространения звука в мелком природном водоеме (глубина водного слоя $h_w = 90$ см) в условиях, когда его поверхность была покрыта слоем льда толщиной $h_i = 36$ см (рис. 1).

Источник звука был размещен в середине водного слоя. Он излучал линейно частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал $f(t)$ с полосой (0.1–10) кГц и с периодом повторения 10 с. Сигнал принимался с помощью четырех вертикальных антенн, каждая из которых содержала по четыре гидрофона, расположенных в воде с шагом 30 см и, таким образом, перекрывающих всю глубину водного слоя. Антенны и источник подключались к общему модулю Lcard E440, который осуществлял синхронную оцифровку данных со всех 16 каналов и запись полученных сигналов в компьютер. Антенны могли позиционировать как отдельно (рис. 1), так и группироваться в одну 16-канальную антенну с уменьшенным шагом между гидрофонами.

Перед началом эксперимента была произведена калибровка имеющихся гидрофонов методом замещения. Такая процедура определяет относительную чувствительность каждого гидрофона как функцию частоты, что позволяет в дальнейшем использовать антенны для определения вертикального профиля акустического давления в водоеме и выделения мод.

Обработка полученных данных производилась путем [3] вычисления корреляционных функций между

сигналом $g_n(t)$, принятым n -м гидрофоном, и излученным сигналом $f(t)$: $K_n(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} g_n(t + \tau) f^*(t) dt$. Эта корреляционная функция пропорциональна импульсному отклику водоема и именно с ней оказывается удобным работать как с «сигналом». Такой подход имеет ряд преимуществ, обсуждавшихся в [3].

Использование 16-канальной антенны позволяет определить распределение акустического давления p с глубиной на различных расстояниях от источника. Полученные профили оказываются близкими к профилям первой моды в модели мягкого дна, что выражается в максимальной величине звукового поля в середине водного слоя и ее спаданию практически до нуля по мере приближения к дну водоема. О том, что дно в водоеме является для распространяющихся в воде мод акустически мягким, свидетельствует и полученные ранее частотные зависимости групповой скорости зарегистрированных сигналов [3].

Интересные результаты были получены в эксперименте с четырьмя отдельными антеннами, расположенными на расстояниях 10 м, 20 м, 40 м и 80 м от источника сигнала. Обработка полученных данных включала в себя частотную фильтрацию, при которой пропускались частоты в диапазоне 3–8 кГц. Таким образом, рассмотрение ведется на частотах, сильно превышающих критические частоты первых мод водоема, что позволяет исключить из рассмотрения дисперсию сигнала. На рис. 2 представлены временные зависимости абсолютной величины прошедших через такой фильтр сигналов, которые были записаны гидрофонами 5 и 10. Данные, полученные с гидрофона 5, т. е. самого нижнего, расположенного вблизи дна водоема (на рис. 2 обозначено красным цветом), позволяют различить три максимума, которым можно сопоставить три распространяющихся волны. Для гидрофона 10 (обозначено на рис. 2 синим цветом) и других гидрофонов, расположенных в слое воды, различимы только два максимума. Сдвиг по времени между сигналами, записанными гидрофонами разных антенн, обусловлен разным расстоянием от них до источника сигнала, а также различной скоростью волн, которые соответствуют разным максимумам. Дальнейшая обработка состояла в построении диаграммы, где по одной оси откладыва-

*E-mail: burov@phys.msu.ru

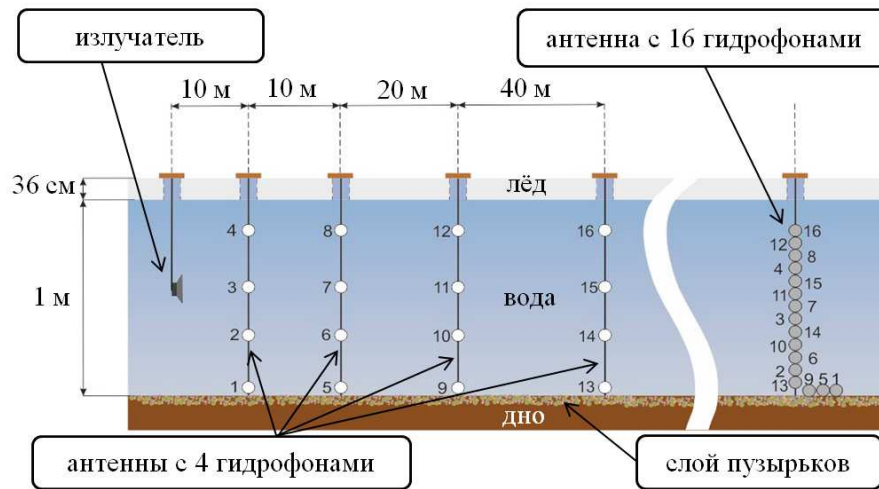


Рис. 1: Схема проведения эксперимента. Номерами обозначены гидрофоны

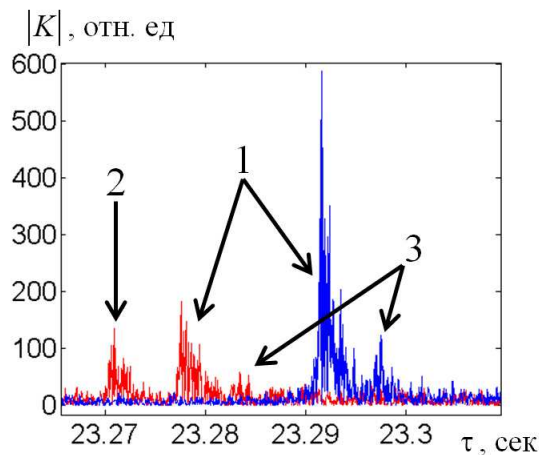


Рис. 2: Характерный вид абсолютной величины сигнала, записанного гидрофонами, после корреляционной обработки и частотной фильтрации. Красным цветом обозначены данные, полученные с гидрофона 5, синим — с гидрофона 10. Цифрами обозначены максимумы, соответствующие трем зафиксированным волнам, которые обладают разными скоростями.

лись координаты антенн, а по другой — времена, соответствующие каждому из зарегистрированных максимумов. Каждой из распространяющихся волн на такой диаграмме соответствует прямая линия, по наклону которой можно определить скорость волны. Максимумы, представленные на рис. 2, позволяют выделить три такие волны, обозначенные цифрами.

Волна 1 имеет скорость $c_1 = 1410$ м/с, что близко к скорости звука в пресной воде. Эта волна регистрируется всеми гидрофонами и соответствует моде водного слоя.

Для волны 2, которая видна лишь на донных гидрофонах, получено значение скорости $c_2 = 2900$ м/с. Это

может соответствовать как продольному, так и поперечному распространению звука в грунте.

Волна 3, как и волна 1, присутствует по всей глубине водоема, но имеет более низкую скорость $c_3 = 1100$ м/с. Природа этой волны требует дополнительного рассмотрения.

В ходе эксперимента была взята проба грунта со дна водоема, и измерена ее плотность, которая составила 2000 кг/м³. Таким образом, между полученными данными имеется некоторое противоречие. С одной стороны, дисперсионные характеристики, а также явное измерение вертикального профиля акустического давления в водном слое говорит о применимости модели мягкого дна для описания распространения волны в водоеме. С другой стороны, импеданс дна, рассчитанный на основе данных о скорости звука и плотности, существенно превышает импеданс воды, а значит, дно должно вести себя как акустически жесткое. Повидимому, причина этого состоит в следующем. Дно водоема покрыто тонким (порядка 10 см) слоем ила, содержащим большое количество пузырьков газа. Благодаря пузырькам скорость звука в этом слое оказывается очень низкой, и именно он, таким образом, играет роль акустически мягкого дна, «экранируя» водный слой от плотного грунта. При этом гидрофоны, расположенные непосредственно на поверхности плотного грунта, под слоем ила, могут регистрировать волны, распространяющиеся с большой скоростью в плотном грунте. Проведенное компьютерное моделирование такого многослойного волновода в среде COMSOL подтвердило справедливость сделанного предположения, но оно еще нуждается в дополнительной непосредственной экспериментальной проверке.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-29-02097 офи_м, № 15-05-01183), а также гранта Президента РФ по программе поддержки ведущих научных школ.

- [1] *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
- [2] *Рожин Ф.В., Тонаканов О.С.* Общая гидроакустика. М.: Изд-во МГУ, 1988.
- [3] *Дмитриев К.В., Дорофеева А.А., Панков И.А., Сергеев С.Н.* Известия РАН. Серия физическая. **79**, № 12. С. 1704. (2015).

Experimental identification of the features of sound propagation in a shallow pond with a system of four vertical antennas

K. V. Dmitriev, A. S. Lipavskiy, I. A. Pankov, S. N. Sergeev, E. A. Fadeev^a

*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: ^aburov@phys.msu.ru*

The experiment of the sound propagation in a shallow pond in a natural environment was made. The pond surface was covered with a layer of ice. The signals were recorded synchronously by the system of four vertical antennas located at different distances from the source. The waves propagating in the water layer and in the pond bottom were detected and its velocities were obtained.

PACS: 43.35.+d, 43.30.+m, 43.60.+d.

Keywords: underwater acoustics, shallow water acoustics, sound velocity.

Сведения об авторах

1. Дмитриев Константин Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
2. Липавский Алексей Сергеевич — студент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
3. Панков Иван Александрович — студент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
4. Сергеев Сергей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
5. Фадеев Евгений Васильевич — студент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.