

## Экспериментальное исследование гео-гидроакустических волн в условиях мелкого моря, покрытого льдом

Д. А. Преснов<sup>1,\*</sup>, Р. А. Жостков<sup>1,†</sup>, А. С. Шуруп<sup>1,2,‡</sup>, А. Л. Собисевич<sup>1,§</sup>

Д. В. Лиходеев<sup>1,¶</sup>, Д. Е. Белобородов<sup>1,\*\*</sup>, Ф. В. Передерин<sup>1,††</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН

Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1

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

Одним из источников информации о физических параметрах неоднородной среды является дисперсия скорости поверхностных волн, амплитуда которых экспоненциально спадает на глубине порядка длины волны. В случае мелкого моря для восстановления глубинных характеристик дна требуется регистрация «донной» волны, распространяющейся вдоль границы упругое дно — водный слой. Для регистрации этой волны, как правило, используют донные системы наблюдений, экспериментальные данные с которых накапливаются на карту памяти, которая после проведения измерений извлекается вместе с датчиком, или данные передаются через надводный трансивер на спутниковые каналы связи. В случае наличия ледового покрова использование донных систем существенно затруднено. В настоящей работе на основе экспериментальных данных показано, что частотно-временной анализ функции взаимной корреляционной сигналов, зарегистрированных широкополосными датчиками, расположенными на свободной поверхности льда, позволяет выделить в принимаемом сигнале информацию о временах распространения донной волны между этими датчиками. Полученный результат позволяет говорить о возможности построения схемы глубинного зондирования неоднородных структур при наличии ледового покрова с существенно сниженными требованиями на практическую реализацию такого подхода.

PACS: 43.20.+g

УДК: 534.6

Ключевые слова: распространение сейсмоакустических волн в неоднородных средах, покрытое льдом мелкое море.

Одним из источников информации о физических параметрах неоднородной среды является дисперсия скорости поверхностных волн, амплитуда которых экспоненциально спадает на глубине порядка длины волны. Поверхностные волны вносят основной вклад в волновое поле, формирующееся вблизи поверхности Земли. В условиях моря покрытого льдом, волновая картина значительно усложняется за счет взаимной трансформации волн различных типов [1]. Впервые модальная структура упругих волн в плавающей ледяной пластине была теоретически описана и измерена экспериментально в работах [2, 3]. Хотя в настоящее время возможности для экспериментального наблюдения и численного моделирования значительно улучшились, современное понимание режимов распространения волн в подобного рода задачах мало изменилось по сравнению с этими пионерскими работами. Изучение рассматриваемой сложно построенной среды («упругое дно–водный слой–ледовый покров») различными методами, в первую очередь, в процессе проведения на-

турных наблюдений, представляет интерес для задачи поиска возможностей измерения скоростных характеристик волн, несущих информацию о среде их распространения.

В настоящей работе приводятся результаты натурных наблюдений сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема. Целью проведенных экспериментальных работ было исследование закономерностей распространения сейсмоакустического сигнала и его трансформацию в волны, распространяющиеся в водном слое, во льду, а также поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы раздела водный слой–упругое дно (в дальнейшем, эта волна будет называться донной волной). Особый интерес представляло изучение возможности регистрации донной волны на основе данных, принятых датчиками, расположенными на свободной поверхности льда. Именно донная волна несет информацию о глубинном строении дна. Для регистрации этой волны, как правило, используют донные системы наблюдений, экспериментальные данные с которых накапливаются на карту памяти, которая после проведения измерений извлекается вместе с датчиком, или данные передаются через надводный трансивер на спутниковые каналы связи. В случае наличия ледового покрова использование донных систем существенно затруднено. Если донную волну удастся зарегистрировать на поверхности льда (или вблизи него), то становится возможным предложить метод глубинного зондирования неоднородных структур дна

\*E-mail: [presnov@physics.msu.ru](mailto:presnov@physics.msu.ru)

†E-mail: [shageraxcom@yandex.ru](mailto:shageraxcom@yandex.ru)

‡E-mail: [shurup@physics.msu.ru](mailto:shurup@physics.msu.ru)

§E-mail: [alex@ifz.ru](mailto:alex@ifz.ru)

¶E-mail: [dmitry@ifz.ru](mailto:dmitry@ifz.ru)

\*\*E-mail: [denbeloborodov@gmail.com](mailto:denbeloborodov@gmail.com)

††E-mail: [crash@ifz.ru](mailto:crash@ifz.ru)

при наличии ледового покрова с существенно сниженными требованиями на практическую реализацию такого подхода.

Экспериментальные работы проводились на озере Умбозеро (рис. 1), расположенном в Мурманской области, вблизи г. Апатиты. Район экспериментальных исследований был выбран с учетом того, что в окрестности озера присутствует несколько действующих горнодобывающих карьеров, хозяйственная деятельность которых сопровождается регулярными промышленными взрывами. Кроме этого, температура в регионе зимой в среднем составляет  $-15^{\circ}\text{C}$ , что приводит к наличию достаточно крепкого ледяного покрова.

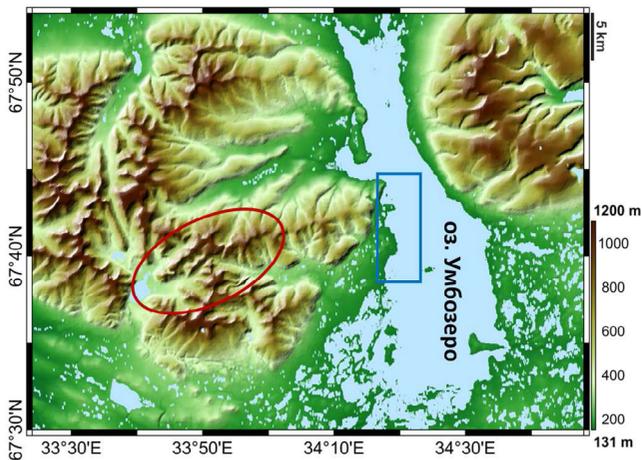


Рис. 1: Регион экспериментальных работ. Синим прямоугольником выделена область приема сигнала. Красной линией отмечена зона в которой проводились промышленные взрывы

Для регистрации волновых возмущений использовались три широкополосных молекулярно-электронных датчика [4] в герметичных корпусах и два маятниковых сейсмоприемника СМЗ-ОС. Оба типа сейсмических датчиков являются вертикальными велосиметрами с приемлемой чувствительностью в полосе 0.03–15 Гц. Запись сигналов велась на регистратор RefTek 130 В с частотой оцифровки 1000 Гц, синхронизация записей на разных точках осуществляется автоматически регистратором при помощи GPS (рис. 2). В процессе подготовки к эксперименту была проведена калибровка всех используемых датчиков.

Была выполнена серия экспериментов по регистрации мощных импульсных сигналов при различном расположении приемников. В первом эксперименте прием сигнала от промышленного взрыва осуществлялся на озере в двух точках, расположенных приблизительно на одной прямой с источником. Расстояние между точками составляло  $\Delta r = 500$  м, а расстояние между берегом и ближайшей точкой было равным 200 м. При этом сейсмометры устанавливались как на дне водоема, так и на поверхности льда.

Обработка записей осуществлялась на основе анализа взаимно-корреляционной функции сигналов, за-

писанных в двух различных точках. В этом случае [5] удастся оценить функцию Грина двух точек, в которых находятся приемники, вид которой определяется свойствами среды. Этот подход удобен тем, что характеристики распространения сигнала между двух станций наблюдения могут быть оценены без знания об эпицентре и точном моменте взрыва. Взаимно-корреляционная функция вычислялась по стандартной формуле:

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t + \tau) dt \quad (1)$$

где  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  — временные ряды, полученные соответственно с первого и второго датчиков. На рис. 3 показана часть взаимно-корреляционной функции сигналов, зарегистрированных на двух сейсмоприемниках, вычисленная для положительных значений временных задержек, что соответствует сигналу, зарегистрированному на второй точке, как если бы источник сигнала действовал в момент времени  $\tau = 0$  и находился в первой точке приема.



Рис. 2: Фотография полевых работ на льду озера с указанием используемой аппаратуры

Анализ корреляционной функции донных сейсмометров в узкой полосе частот 5–8 Гц позволяет выделить максимум, положение которого является оценкой времени распространения сигнала между приемниками  $\tau_D = 0.2$  с. Откуда скорость волны, вызванная взрывом, на дне водоема равна  $A = \Delta r / \tau_D = 2500$  м/с. По полученному значению скорости можно утверждать, что основной вклад в сигнал на донных станциях в полосе частот 5–8 Гц вносит фундаментальная мода [1] донной волны. На рис. 3 справа, у корреляционной функции, наблюдается уже два максимума при значениях  $\tau_8 = 1.36$  с и  $\tau_D = 0.2$  с. Большой временной сдвиг соответствует более медленной волне, которую можно интерпретировать, как изгибающую волну, распространяющуюся в слое льда; её скорость в условиях эксперимента составляет  $A = \Delta r / \tau_8 = 367$  м/с. Второй наблюдаемый максимум в точности равен времен-

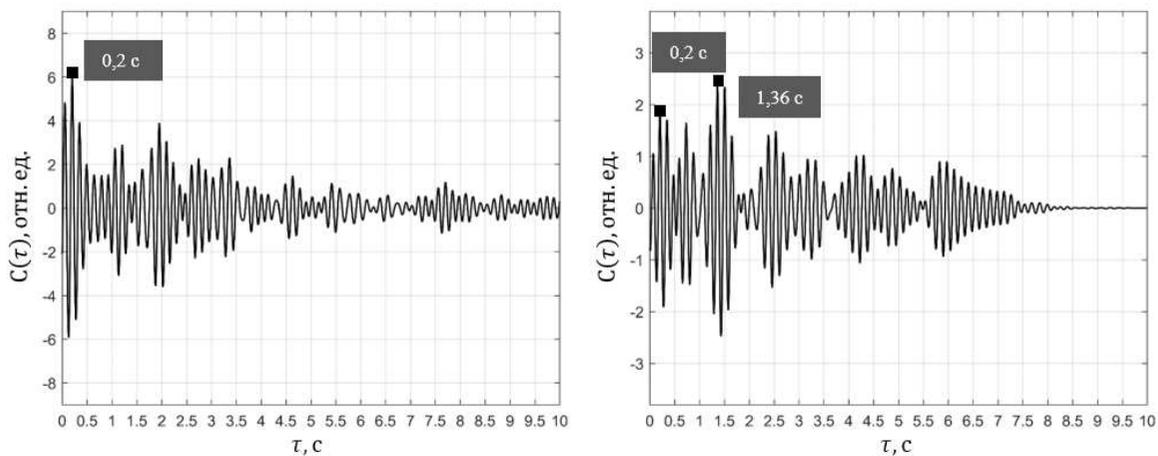


Рис. 3: Взаимо-корреляционная функция сигнала от промышленного взрыва, зарегистрированного на дне водоема (слева) и на поверхности льда (справа) в полосе частот 5–8 Гц

ной задержке на донных сейсмометрах и соответствует скорости распространения донной волны.

Результаты экспериментальных оценок скоростей выделенных волн сопоставлялись с результатами численного моделирования. Для этого использовались результаты работы [1], где было получено дисперсионное уравнение для слоистой среды, состоящей из упругого слоя (лед), жидкого слоя (морская толща) и упругого однородного полупространства (дно). При численном моделировании задавались экспериментально измеренные значения толщины льда  $h_1 = 0.15$  м и глубины волновода  $h_2 = 8$  м, скорость звука в воде полагалась равной  $c_0 = 1.5$  км/с, плотность  $\rho_0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Остальные параметры рассматриваемой среды перебирались в заданном диапазоне, после чего рассчитывались дисперсионные зависимости и сравнивались с результатами экспериментальных оценок. В итоге были получены следующие значения параметров дна водоема, для которых теоретические значения скоростей были наиболее близки к экспериментальным оценкам: скорость продольных волн  $c'_l = 4.4$  км/с, скорость поперечных волн  $c'_t = 2.2$  км/с, плотность  $\rho' = 2000$  кг/м<sup>3</sup>. Полученные в результате моделирования значения скоростей для изгибной и донной волны, указывают на правильность сделанного предположения о выделении донной волны в данных, зарегистрированных датчиками, расположенными на льду.

Также была проверена возможность оценки функции Грина между приемниками в пассивной схеме, без использования сигналов от промышленных взрывов. Следуя работам [5, 6] для решения задачи выделения

волновых возмущений в среде по записям только сейсмического фона можно использовать функцию взаимной корреляции шума, с предварительным «обелением» и амплитудной нормализацией записей. При измерениях в этом случае расстояние между двумя приемниками СМЗ-ОС, установленными на лед, составляло 4 км, а накопление производилось в течение 40 часов. Было показано, что и в случае пассивного эксперимента, данные, зарегистрированные на льду, позволяют получить информацию о характеристиках распространения донной волны.

Итак, проведение натурального эксперимента в условиях водоема, покрытого льдом и последующий частотно-временной анализ корреляционной функции сигналов, зарегистрированных донными и ледовыми широкополосными сейсмическими датчиками, позволяет сделать предположение о том, что шумовое поле, принимаемое на поверхности льда, несет в себе полезную информацию о структуре дна и может быть исследовано методами, разработанными для анализа сейсмического шума.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментальных исследований заместителю директора по научной работе Горного института КНЦ РАН профессору А. А. Козыреву, а также лаборатории «Технологических процессов при добыче полезных ископаемых» и её руководителю С. А. Козыреву.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проекты №16-29-02046 и №16-35-00547).

[1] Преснов Д. А. и др. Акуст. журн. **60**, № 4. С. 426. (2014).

[2] Ewing M., Crary A. P. Physics. **5**, P. 165. (1934).

[3] Press F., Ewing M. Eos Trans. AGU. № 32. P. 673. (1951).

[4] Шабалина А. С. и др. Усп. совр. радиоэлектроники.

№ 9. С. 33. (2014).

[5] Королева Т. Б., Яновская Т. Б., Патрушева С. С. Физика Земли. № 5. С. 3. (2009).

[6] Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С. Акуст. журн. 54. № 1. С. 51. (2008).

**Experimental study of geo-hydroacoustic waves in an ice covered shallow sea****D. A. Presnov<sup>1,a</sup>, R. A. Zhostkov<sup>1,b</sup>, A. S. Shurup<sup>1,2,c</sup>, A. L. Sobisevich<sup>1,d</sup>, D. V. Likhodeev<sup>1,e</sup>, D. E. Beloborodov<sup>1,f</sup>, F. V. Perederin<sup>1,g</sup>**<sup>1</sup>*The Shmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow 123995, Russia*<sup>2</sup>*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*  
E-mail: <sup>a</sup>presnov@physics.msu.ru, <sup>b</sup>shageraxcom@yandex.ru, <sup>c</sup>shurup@physics.msu.ru, <sup>d</sup>alex@ifz.ru, <sup>e</sup>dmitry@ifz.ru, <sup>f</sup>denbeloborodov@gmail.com, <sup>g</sup>crash@ifz.ru

One of the information sources about physical properties of the inhomogeneous medium is a dispersion of surface wave velocity, which amplitude decays exponentially at a depth about the wavelength. In the case of shallow water for the characteristics of the deep bottom recovery the registration of the «bottom» wave propagating along the boundary «elastic bottom–water layer» is required. For this wave registration usually ocean bottom systems are used. The experimental data are accumulated in the memory card that is removed after the measurement with the sensor, or data is transmitted through the satellite transceiver to surface communication channels. In the case of sea covered with ice use of these systems significantly hampered. This paper, based on experimental data shows that the time-frequency analysis of the cross-correlation function of signals, recorded by wideband sensors located on the surface of the ice, allows you to select in the received signal information on the propagation time of the waves between the bottom sensors. The obtained result allows speaking about the possibility of constructing of a sounding of deep inhomogeneous structures in the presence of ice cover with significantly reduced requirements on the practical implementation of this approach.

PACS: 43.20.+g

Keywords: distribution of seismic acoustic waves in heterogeneous environments, ice-covered shallow sea.

**Сведения об авторах**

1. Преснов Дмитрий Александрович — вед. инженер; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: presnov@physics.msu.ru.
2. Жостков Руслан Александрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: shageraxcom@yandex.ru.
3. Андрей Сергеевич Шуруп — канд. физ.-мат. наук, инженер; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: shurup@physics.msu.ru.
4. Алексей Леонидович Собисевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: alex@ifz.ru.
5. Дмитрий Владимирович Лиходеев — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: dmitry@ifz.ru.
6. Денис Евгеньевич Белобородов — вед. инженер; тел.: (499) 254-89-97, denbeloborodov@gmail.com.
7. Фёдор Викторович Передерин — науч. сотрудник; тел.: (499) 254-89-97, alex@ifz.ru.