

УДК 534.231

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

© 2022 г. А. А. Луньков^{1,*}, В. Г. Петников^{1,**}

Представлено академиком РАН О. В. Руденко 12.04.2022 г.

Поступило 13.04.2022 г.

После доработки 13.04.2022 г.

Принято к публикации 19.04.2022 г.

В работе развит метод решения обратной задачи, состоящей в одновременной оценке донного рельефа и эффективных акустических параметров дна для мелководной акватории, покрытой льдом, которая представляет собой волновод переменного сечения. Метод основан на приеме и обработке широкополосных (импульсных) сигналов, возбуждаемых одиночным источником звука и регистрируемых удаленной вертикальной цепочкой гидрофонов (антенной). Измерения рельефа дна осуществляются при сравнении времен распространения сигналов, отраженных от нижней границы волновода и прошедших на различные гидрофоны антенны. Определение эффективных параметров (скорости звука, плотности, коэффициента затухания акустических волн) производится при анализе угловой зависимости коэффициента отражения, вычисляемого как отношение амплитуды отраженного от дна импульса к амплитуде прямого сигнала с учетом сферического расхождения фронта волны. Эксперименты по апробации предложенного подхода проведены в прибрежной зоне озера Байкал в зимне-весенний период.

Ключевые слова: вертикальная приемная антенна, геоакустическая инверсия, ледовый покров

DOI: 10.31857/S2686740022040071

Активное освоение Арктического шельфа требует разработки методов акустического мониторинга и диагностики, адаптированных для акваторий, покрытых льдом. Одной из целей акустической диагностики является дистанционное неразрушающее определение характеристик верхнего слоя донных осадков (геоакустическая инверсия), что при наличии ледового покрова представляется сложной задачей. В недавней работе [1] для решения такой задачи нами была предложена методика оценки эффективных параметров дна (скорости звука, плотности, коэффициента затухания акустических волн), которая основана на анализе вертикального разреза звукового поля, возбуждаемого точечным тональным источником и регистрируемого вертикальной приемной антенной, перегораживающей весь водный слой по глубине. При этом расстояние между излучателем и антенной должно быть много больше средней глубины волновода вдоль

акустической трассы, а изменение глубины не должно быть резким. Отметим, что при использовании импульсного сигнала геоакустическая инверсия в мелком море с неоднородной батиметрией может быть реализована и с одиночным приемником, если эта батиметрия известна [2]. Однако в ряде случаев, например, при наличии ледового покрова, подробная карта глубин, получаемая с помощью эхолота, может быть недоступна, и для решения обратной задачи потребуется предварительная оценка профиля дна.

Настоящая работа посвящена решению вопроса дистанционной оценки как акустических характеристик, так и профиля дна в условиях ледового покрова на стационарной трассе, организованной между широкополосным излучателем и вертикальной приемной антенной в области резкого изменения глубины. (Акустическая трасса ориентирована вдоль берегового клина.) Развиваемый новый подход в отличие от работы [1] не имеет ограничения на величину производной глубины акватории по расстоянию на трассе распространения звука. Как и в работе [1], апробация развиваемой методики проводится на основе натуральных данных, полученных в ходе эксперимента в прибрежной области озера Байкал. Здесь

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

**E-mail: petniko@kapella.gpi.ru

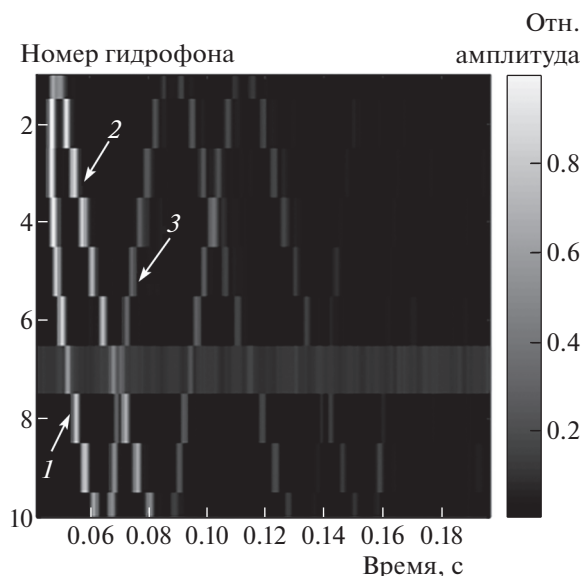


Рис. 1. Пространственно-временная структура принятого сигнала на вертикальной антенне после корреляционной обработки: 1 – прямой сигнал, 2 – отраженный от поверхности, 3 – отраженный от дна. Амплитуда сигнала нормирована на максимальное значение. На гидрофоне № 7 было низкое отношение сигнал / шум.

использовались данные, зарегистрированные с помощью другой более длинной антенны, расположенной в более глубокой части акватории. Эта же антенна, в частности, использовалась и для приема информационных сигналов при звукоподводной связи подо льдом [3].

Эксперимент на озере Байкал [1, 3] был проведен в конце марта 2019 г. Толщина сплошного ледового покрова (припая) составляла около 66 см. Температура в воде слабо зависела от глубины и составляла примерно 1°C , что соответствует скорости звука [4] $c = 1409$ м/с. Излучающая пьезокерамическая сфера диаметра 80 мм находилась на глубине $z_s = 18$ м при глубине места 55 м (по данным эхолота, опущенного в лунку в ледовом покрове). Приемная антенна длиной 72 м, состоящая из 10 гидрофонов, была расположена в 66 м от излучателя в направлении от берега. Глубина верхнего гидрофона равнялась $z_1 = 6.7$ м. Расстояние между гидрофонами составляло $\Delta z = 7.5$ м. Глубина в месте расположения антенны была 86 м. Излучатель звука и антенна были соответственно закреплены на вертикально ориентированных и растянутых между донным якорем и ледовой поверхностью фалах. В результате положения излучателя и гидрофонов не изменялись с течением времени.

Источник звука излучал ЛЧМ-сигнал в полосе 400–1400 Гц длительностью 10 с, который регистрировался антенной и обрабатывался для каждого гидрофона по алгоритмам оптимального корреляционного приема. Результат такой обработки показан на рис. 1, где приведена нормированная пространственно-временная структура

принимаемых импульсов, из которой можно выделить приходы до 8 лучей (первые три типа лучей отмечены на рис. 1 цифрами, $i = 1, 2, 3$). Нулевое время здесь отвечает времени излучения сигнала. Всего было проведено 18 циклов излучения ЛЧМ-сигнала.

Зная глубину расположения источника звука z_s и приемных гидрофонов $z_j = z_1 + (j - 1)\Delta z$ ($j = 1, 2, \dots, 10$ – номер гидрофона), скорость звука c в водном слое, а также экспериментальные времена прихода τ_{ij} сигналов вдоль разных лучей, можно оценить профили верхней и нижней границы волновода. Время распространения прямого сигнала τ_{1j} позволяет вычислить расстояние между излучателем и j -м гидрофоном $r_{1j} = \tau_{1j}c$.

Для начала оценим профиль верхней границы волновода и убедимся, что нижняя поверхность льда была достаточно ровной. Рассмотрим первое отражение от границы раздела вода–лед. Будем полагать, что для каждого гидрофона существует лишь одна единственная точка, в которой сигнал отразился от указанной границы. Тогда расстояние, которое проходит однократно отраженный ото льда сигнал, можно найти как $r_{2j} = \tau_{2j}c$. Таким образом, мы имеем две точки (источник и приемник) с известными координатами и неизвестную точку отражения, которая лежит таким образом, что суммарное расстояние от нее до источника и приемника равно расстоянию, пройденному сигналом r_{2j} . Интересующая нас точка отражения находится на эллипсе (в трехмерном случае – на эллипсоиде) с одним фокусом в источнике сигнала.

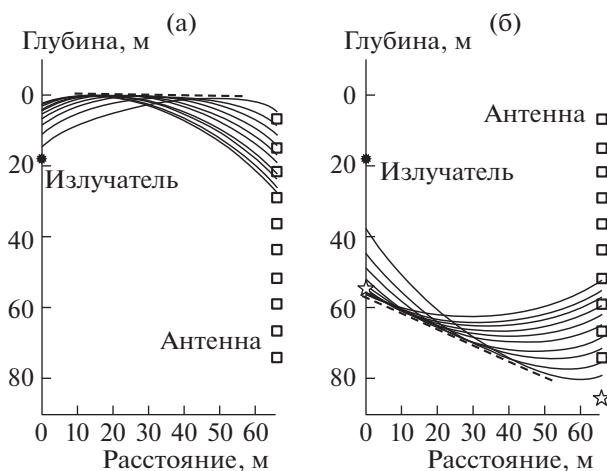


Рис. 2. а – Оценка профиля нижней границы льда; б – оценка профиля дна. Сплошными линиями показаны элементы эллипсов, штриховыми – общие огибающие. Звездочками отмечены глубины, полученные с помощью эхолота.

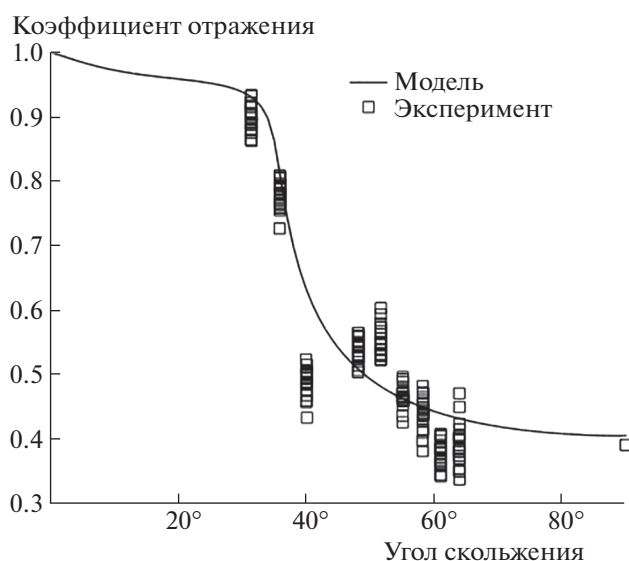


Рис. 3. Экспериментальные значения и модельная угловая зависимость модуля коэффициента отражения от дна.

ла, а другим – в месте расположения гидрофона. Соответственно для 10 приемников можно построить 10 эллипсов, элементы которых изображены на рис. 2а. Нижняя поверхность льда будет соответствовать общей огибающей этих эллипсов, которая показана штриховой линией на том же рисунке. Как видно, нижняя граница льда является достаточно ровной, что свойственно для однолетнего льда. Действуя аналогичным образом, можно оценить профиль дна. В этом случае будут использоваться времена прохождения однократно отраженного от дна сигнала τ_{3j} (без отражения от льда) и соответствующие расстояния $r_{3j} = \tau_{3j}c$. Результат такой оценки приведен на рис. 2б, где явно видно, что дно в этой части аква-

тории имеет значительный, но близкий к постоянному уклон 25° . Звездочками на этом же рисунке отмечены глубины, измеренные с помощью эхолота. В условиях ровной верхней границы волновода для оценки профиля дна также возможно использование времен прихода лучей, два или три раза отраженных от границ и отвечающих однократно отражению от дна и однократно или двукратно отражению от ледовой поверхности. Точность такого метода определения профиля границ при оценке сверху примерно равна длине звуковой волны, т.е. ≈ 1 м.

Имея уточненный профиль донной поверхности, проведем оценку эффективных акустических параметров дна (скорости звука, плотности и коэффициента затухания), используя информацию

об относительной амплитуде A_j зарегистрированных на антенне импульсов. Указанная оценка может быть осуществлена путем анализа угловой зависимости модуля коэффициента отражения от границы вода / дно. Коэффициент отражения для j -го гидрофона вычисляется с учетом сферического расхождения фронта волны как

$$R_j = \frac{A_{3j} r_{3j}}{A_{1j} r_{1j}}. \quad (1)$$

Соответствующие углы скольжения α_j вычисляются из геометрических соображений. Результаты экспериментальной оценки коэффициента отражения от дна $R_j(\alpha_j)$ показаны на рис. 3 квадратиками. Каждый квадратик соответствует значению $R_j(\alpha_j)$, полученному для одного цикла измерений (для одного из 18 излучаемых импульсов). Разброс в значениях коэффициента отражения для каждого вертикального набора квадратиков связан с ошибкой измерений, которая, в свою очередь, была обусловлена присутствием акустических шумов. На этой кривой точка, отвечающая углу 90° , была получена по данным с контрольного гидрофона, расположенного в двух метрах над излучателем. Отметим, что с помощью данного подхода была получена угловая зависимость модуля коэффициента отражения от верхней границы, значение которого почти не отличалось от единицы.

Выполним геоакустическую инверсию параметров дна, сравнивая экспериментальную угловую зависимость $R_j(\alpha_j)$ и теоретические зависимости (2), рассчитанные для различных значений параметров дна, с помощью метода наименьших квадратов:

$$R_j(\alpha_j) = \frac{m \sin \alpha_j - \sqrt{n^2 - (\cos \alpha_j)^2}}{m \sin \alpha_j + \sqrt{n^2 - (\cos \alpha_j)^2}}, \quad (2)$$

где $m = \frac{\rho_b}{\rho}$ — отношение плотности дна к плотности воды, $n = \frac{c}{c_b} \left(1 + i \frac{\alpha_b}{2}\right)$ — отношение скорости звука в воде c к скорости звука в дне c_b с учетом затухания.

Комбинацию параметров (c_b, ρ_b, α_b) , которая дает минимальную невязку между теоретической и экспериментальной зависимостями, будем считать искомой и отвечающей эффективным параметрам дна. При этом под экспериментальной зависимостью здесь будем понимать зависимость, построенную по средним значениям $R_j(\alpha_j)$ для каждого вертикального набора квадратиков на рис. 3. Отметим, что при моделировании коэффициента отражения дно предполагается однородным полупространством без сдвиговых волн.

Результат оценки эффективных акустических параметров дна:

скорость звука в дне c_b : 1730 м/с,

плотность дна ρ_b : 1920 кг/м³,

коэффициент затухания звука в дне β_b , отнесенный к длине волны λ ($\beta_b = 27.3\alpha_b$): 0.82 дБ/λ.

Соответствующая этим значениям теоретическая угловая зависимость модуля коэффициента отражения показана на рис. 3 сплошной линией.

Некоторое отличие найденных значений от величин, полученных в [1], может быть обусловлено тем, что в цитируемой работе была выбрана другая акустическая трасса, которая была в 5 раз длиннее. Регистрируемые в работе [1] звуковые лучи падали на границу раздела вода—дно под малыми углами скольжения, соответствующими углам полного внутреннего отражения. Эффективные параметры дна, зависящие от глубины проникновения звука в дно, в этой ситуации могут быть другими, что обусловлено неоднородностью по глубине реальных параметров.

В настоящей работе предложен подход, позволяющий последовательно оценивать профиль и параметры дна на стационарной акустической трассе между одиночным источником и вертикальной приемной антенной, расположенными подо льдом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность М.М. Макарову, К.М. Кучеру и А.В. Шатравину за помощь в проведении натуральных экспериментов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана РНФ, проект № 22-72-10121.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.А., Кучер К.М., Луньков А.А., Макаров М.М., Петников В.Г. Акустические характеристики дна озера Байкал // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 5. С. 517–526.
2. Фершалов М.Ю., Петров П.С., Манульчев Д.С., Захаренко А.Д.. Обобщение метода геоакустической инверсии по записи импульсного сигнала одиночным гидрофоном с учетом неоднородностей батиметрии // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1 (35). С. 51–57.
3. Волков М.В., Луньков А.А., Макаров М.М., Петников В.Г., Шатравин А.В. Применение вертикальных приемных антенн для звукоподводной связи в неоднородном волноводе с ледовым покровом // ДАН. 2021. Т. 496. № 4. С. 65–68.
4. Куимова Л.Н., Иванов В.Г. О скорости звука в Байкале // ДАН. 2002. Т. 386. № 1. С. 103–107.

USING A VERTICAL RECEIVING ARRAY FOR GEOACOUSTIC INVERSION IN A SHALLOW-WATER WAVEGUIDE WITH AN ICE COVER

A. A. Lunkov^a and V. G. Petnikov^a

^a*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS O.V. Rudenko

The paper develops a method for solving the inverse problem, which consists in the simultaneous assessment of the bottom topography and its effective acoustic parameters for a shallow water area covered with ice. This area is a plane waveguide of variable cross section. The method is based on the reception and processing of broadband (pulse) signals excited by a single sound source and recorded by a remote vertical chain of hydrophones (array). The bottom topography measurements are carried out by comparing the propagation times of signals reflected from the lower boundary of the waveguide and arriving at different array hydrophones. The effective parameters (sound speed, density, attenuation coefficient of acoustic waves) are determined by analyzing the angular dependence of the reflection coefficient, calculated as the ratio of the amplitude of the pulse reflected from the bottom to the amplitude of the direct signal, taking into account the spherical spreading of the wave front. Experiments to test the proposed approach were carried out in the coastal zone of Lake Baikal in the winter-spring period.

Keywords: vertical receiving array, geoacoustic inversion, ice cover