

О ВАРИАЦИЯХ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ЛЕДОВОМ ПОКРОВЕ

© 2023 г. В. Г. Петников^а, *, А. В. Шатравин^б, **, А. А. Луньков^{а, с}, ***

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38 Москва, 119991 Россия

^бИнститут океанологии им. П.П. Шишова РАН, Нахимовский пр-т, 36, Москва, 117997 Россия

^сМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, 105005 Россия

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

**e-mail: ashatravin@ocean.ru

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

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

В экспериментах на стационарной акустической трассе под сплошным ледовым покровом получены оценки возможных значений вариаций времен распространения звуковых сигналов на расстояниях в ≈ 4 км с периодом более 100 с. Эксперименты выполнены на оз. Байкал в весенний период, когда вертикальный профиль скорости звука имеет два характерных для пресноводных акваторий участка: верхний слой с близкой к постоянной скоростью звука и нижний с линейным ростом скорости звука. В этих условиях вариации времени распространения не превышали $\sim 10^{-4}$ с. Численное моделирование показало, что вариации времен распространения, обусловленные изменчивостью среды, минимальны для случая нахождения источника и приемника звука в верхнем слое. Продемонстрировано, что в этом случае в качестве эффективного значения скорости звука, определяющего время распространения, допустимо брать скорость звука в верхнем квазиоднородном слое. Полученные результаты позволили сформулировать рекомендации по подледному акустическому позиционированию автономных необитаемых подводных аппаратов.

Ключевые слова: распространение звука подо льдом, акустическое позиционирование и навигация

DOI: 10.31857/S032079192360021X, **EDN:** TNYSDM

ВВЕДЕНИЕ

Исследования флуктуаций времени распространения акустических сигналов между неподвижными источником и приемником звука в условиях ледового покрова востребованы как для оценки вариаций средней температуры воды подо льдом, так и для задач позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Здесь имеются в виду флуктуации, в первую очередь обусловленные временной изменчивостью подводной среды. Подобные исследования особенно актуальны для АНПА, так как при наличии ледового покрова отсутствует возможность всплытия и определения местоположения по сигналам спутниковой навигационной системы [1, 2]. Подобные флуктуации, в основном, зависят от следующих факторов [1, 2]:

1. характеристик “опорного” вертикального профиля скорости звука в районе исследований, определяемого, в том числе, и временем года;

2. расстояния между источником и приемником звука, а также от глубин их погружения;

3. скорости дрейфа ледового покрова, в том случае, когда источник и приемник звука закреплены на дрейфующей льдине.

Отметим, что особое внимание при подобных исследованиях следует уделять точности измерений времени распространения (точности используемых “часов”).

В качестве примера приведем результаты работы [1], где с учетом перечисленных выше факторов получена относительно небольшая ошибка определения расстояния до АНПА 1.84 ± 2.19 м при дистанциях около 3 км. В то же время можно предположить, что подобная ошибка окажется заметно меньше в ситуации, когда:

✓ акустические навигационные маяки расположены на неподвижном льду (на ледовом припае),

✓ для вертикального профиля скорости звука $c(z)$ в подледном акустическом волноводе характерен верхний участок с примерно постоянной

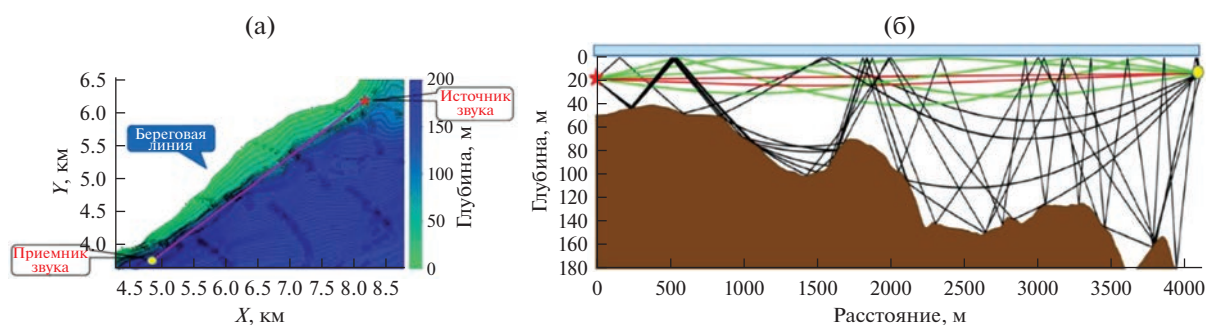


Рис. 1. (а) — Схема эксперимента и (б) — лучевые траектории распространения звука в вертикальной плоскости. Звездочкой показано местоположение источника, кружком — приемника.

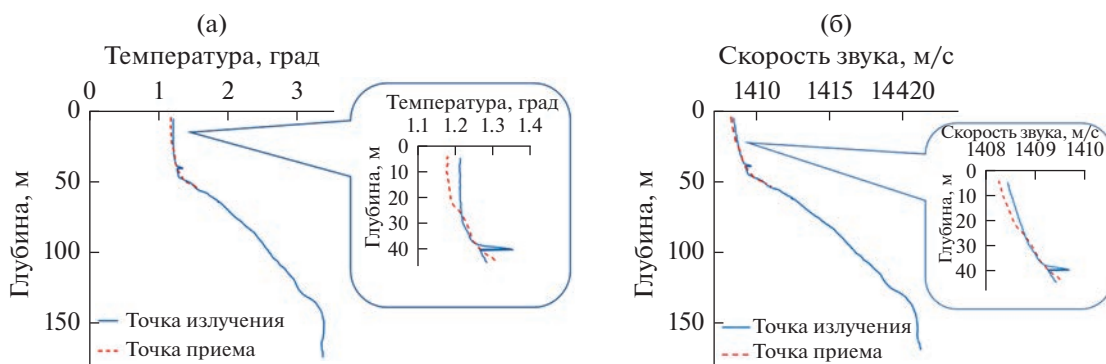


Рис. 2. Вертикальные профили (а) — температуры и (б) — скорости звука в точке излучения и приема.

скоростью звука c и нижний, где величина c возрастает по линейному закону с глубиной z . Такой профиль характерен для пресноводных акваторий ранней весной.

В настоящей работе на основе данных натурального эксперимента получены оценки сверху возможных значений вариаций времен распространения звуковых сигналов в указанной ситуации. В рамках численного моделирования проанализированы возможные причины подобных вариаций. Обсуждаются возникающие в этом случае методические особенности подводного акустического позиционирования.

1. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Натурный эксперимент был проведен ранней весной в прибрежном мелководном районе оз. Байкал в области ледового припая (подходящий вплотную к берегу устойчивый ледовый покров со сплоченностью льда 10). Источник звука (керамическая сфера) был закреплен на растянутом между донным якорем и верхней поверхностью льда несущем тросе на глубине $z_s = 18.4$ м. Приемник звука (одиночный гидрофон) был опущен с ледовой поверхности на глубину $z_r = 14$ м на

расстоянии $R = 4.1$ км от источника. Толщина ледового покрова составляла ≈ 0.7 м. На рис. 1 приведена схема эксперимента.

На рис. 2 показаны: вертикальные профили температуры, измеренные в точках излучения и приема непосредственно перед проведением эксперимента, и соответствующие расчетные профили скорости звука. Измерение профилей температуры проводилось с помощью калиброванного STD-зонда. Для расчета скорости звука использовались эмпирические расчетные формулы, полученные для воды на Байкале [3]. Отметим, что вертикальные профили температуры и скорости звука имеют типичную для пресноводных акваторий форму.

В эксперименте излучались сигналы с линейной частотной модуляцией. Длительность одной посылки сигнала была равна 10.0436 с, рабочая полоса частот 400–10000 Гц. Период следования сигналов составлял $t_0 \approx 10$ с. Огибающие сигналов с выхода оптимального корреляционного приемника для 15 следующих друг за другом импульсных откликов показаны на рис. 3. При построении рис. 3 каждый последующий импульсный отклик сдвигался по времени прихода таким образом, чтобы максимальный по амплитуде (второй) максимум огибающей корреляционной функции каждого

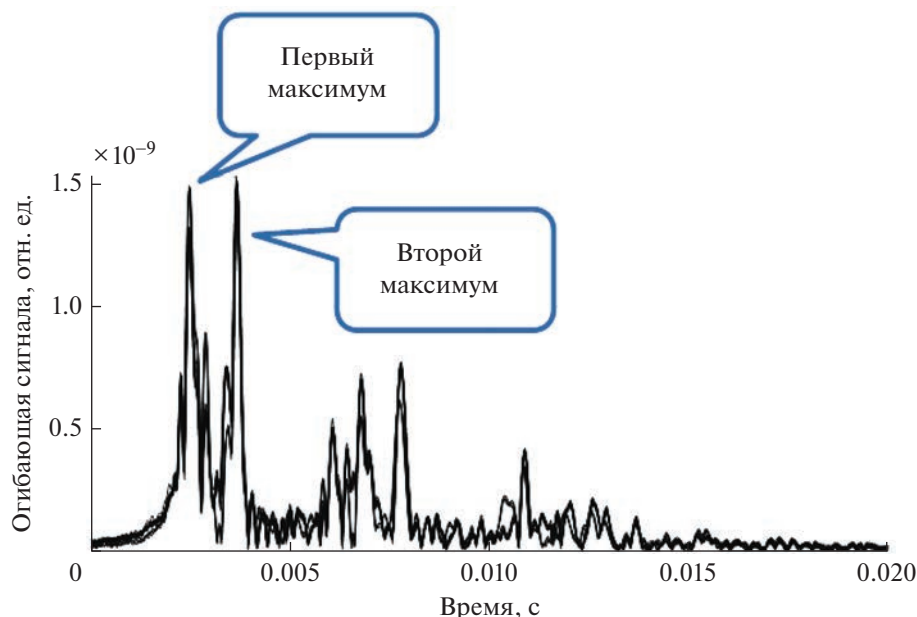


Рис. 3. Огибающие сигналов с выхода корреляционного приемника для 15-ти следующих друг за другом импульсов.

импульсного отклика отображался на графике в одно и то же время. Как видно на рис. 3, форма огибающей корреляционной функции практически не меняется на протяжении всего времени излучения сигналов, что говорит о высокой стабильности канала на протяжении эксперимента. Дальнейшая обработка показала, что время распространения сигнала от источника к приемнику звука в ходе эксперимента могло изменяться в очень небольших пределах, причем эти пределы были обусловлены главным образом точностью измерений.

На эту точность в первую очередь влияли акустические шумы, присутствующие в акватории озера. Влияние шумов проиллюстрировано на рис. 4, где “звездочками” отмечены вариации времени распространения для отдельных сигналов. Здесь по оси абсцисс отложено текущее время эксперимента Δt_i , отсчитываемое от момента прихода 7-го из 15 сигнала, определяемое по основному максимуму огибающей. Другими словами, по горизонтальной оси отложена величина $\Delta t_i = t_i - t_7$, где t_i — время регистрации основного максимума огибающей сигнала с номером i . По оси ординат отложена величина $\widehat{\Delta t}_i = \Delta t_i - (i - 7) \times t_0$, равная изменению времени распространения по отношению к сигналу с номером 7. Прямой линией показана линейная регрессия измеренных значений. Тангенс угла наклона этой прямой равен $k_1 = (7.00 \pm 0.13) \times 10^{-7}$, где доверительный интервал рассчитан с использованием распределения Стьюдента для уровня доверительной вероятности 90%. Основным фактором, обуславливаю-

щим отклонение результатов измерений от прямой линии, здесь является, по-видимому, аддитивный акустический шум. Таким образом, из рисунка следует, что вариации длительности распространения t за период 140 с находятся в интервале $\widehat{\Delta t} = 0.8 \times 10^{-4} - 1.16 \times 10^{-4}$ с доверительной вероятностью 90% (при условии, что период следования сигналов равен $t_0 = 10.087276$ с).

Еще одна причина погрешности измерений была связана со случайными вариациями периода следования сигналов, обусловленными вариациями частоты используемых кварцевых генераторов. Таким образом, точное значение периода было нам не известно. Это значение с доверительной вероятностью 90% лежало в интервале $t_0 = 10.087258 - 10.087294$ с при температуре окружающего воздуха около 0°C (такая температура воздуха была во время проведения натурного эксперимента). Оценка среднего значения периода следования сигналов $t_0 = 10.087276$ с использовалась для оценок описанных выше возможных вариаций времени распространения, обусловленных аддитивным акустическим шумом. С учетом диапазона вероятных значений периода, возможный интервал изменений времени распространения $\widehat{\Delta t}$ (интервал возможных отклонений от среднего значения) составил от -1.5×10^{-4} до 3.5×10^{-4} с.

Заметим, что этот интервал включает и нулевое значение. Таким образом, в результате мы можем лишь указать пределы возможных изменений эффективной скорости звука c_{ef} подо льдом за время измерений 140 с. Здесь под c_{ef} понимает-

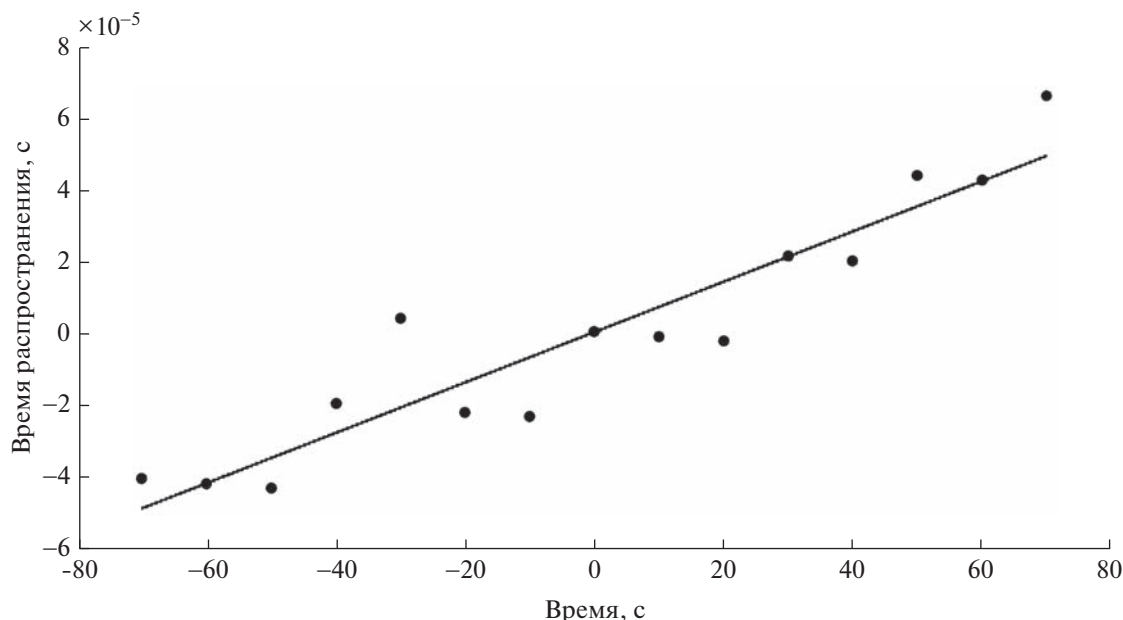


Рис. 4. Зависимость времени распространения от текущего времени. Точки — результаты измерений, прямая — линия регрессии.

ся величина, входящая в формулу $R = c_{\text{ef}} t$, где R — расстояние между источником и приемником звука, а t — разность времени начала излучения сигнала и времени регистрации основного максимума огибающей сигнала на выходе оптимального корреляционного приемника. Указанные пределы соответственно равны: $\Delta c_{\text{ef}} = -0.073...+0.17$ м/с, при средней скорости $c_{\text{ef}} \approx 1409$ м/с.

2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рис. 1 позволяет предположить, что указанные выше величины Δc_{ef} соответствуют вариациям реальной скорости звука в верхнем однородном слое. Как видно на этом рисунке, при нашей геометрии эксперимента существуют прямые лучи, не взаимодействующие ни с ледовым покровом, ни с дном. Также присутствуют лучи, испытавшие 1–2 отражения от верхней границы. Сигналы, распространяющиеся вдоль этих лучей, имеют минимальное время распространения, вариации которого и были измерены в нашем эксперименте. Соответственно, под c_{ef} и ее вариациями следует понимать скорость звука в верхнем слое и ее изменения. Эти соображения общего характера получили подтверждение в численном эксперименте для двух модельных волноводов, профили скорости звука в которых изображены на рис. 5а. Разность скорости звука в верхнем однородном слое для указанных модельных волноводов составляет $\Delta c = 0.2$ м/с. При расчетах в рамках луче-

вого описания [4] предполагалось, что волноводы имеют профиль дна, как на рис. 1б, а возможные трехмерные эффекты не учитывались. На рис. 5б вертикальными линиями изображены амплитуды этих лучей. При этом положение этих линий на горизонтальной оси соответствует времени распространения сигналов вдоль лучей для двух указанных моделей. Выбранные при моделировании глубины расположения источника и приемника звука и расстояние между ними соответствуют значениям в натурном эксперименте. Как видно на рис. 5б, разность времен распространения первых приходов равна $\Delta t = 4.13 \times 10^{-4}$ с, что соответствует ожидаемой величине $\Delta t \approx -R/c^2 \Delta c$, где c — скорость звука в верхнем однородном слое ($c = 1409$ м/с).

Следует также отметить, что вариации скорости звука в нижнем слое, связанные, например, с прохождением внутренних волн (ВВ), характерных для оз. Байкал [5], не могут привести к изменениям времени распространения для рассмотренных глубин излучателя/приемника звука и расстояния между ними. На рис. 6а показаны расчетные возмущения профиля скорости звука в поле первой моды ВВ с амплитудой 2 м. При таких возмущениях в случае нахождения приемника в верхнем перемешанном слое отсутствуют сколько-нибудь заметные вариации времени распространения сигналов (см. рис. 6б). Однако такие вариации заметны, если прием сигналов осуществляется в нижнем слое, возмущаемом ВВ (см. рис. 6в.) Здесь, как и выше, сравниваются

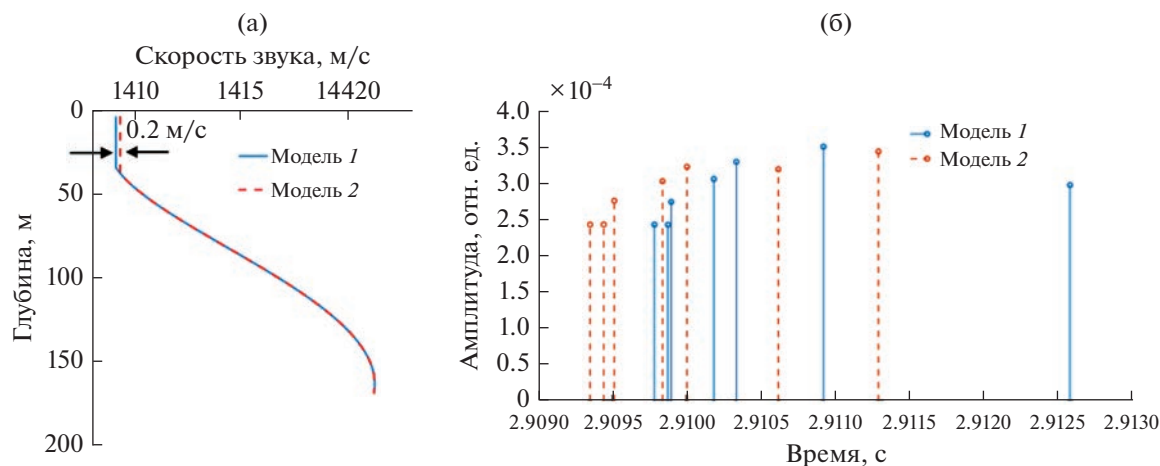


Рис. 5. (а) — Модельные профили скорости звука и (б) — амплитуды сигналов, соответствующих лучам, не взаимодействующим с дном.

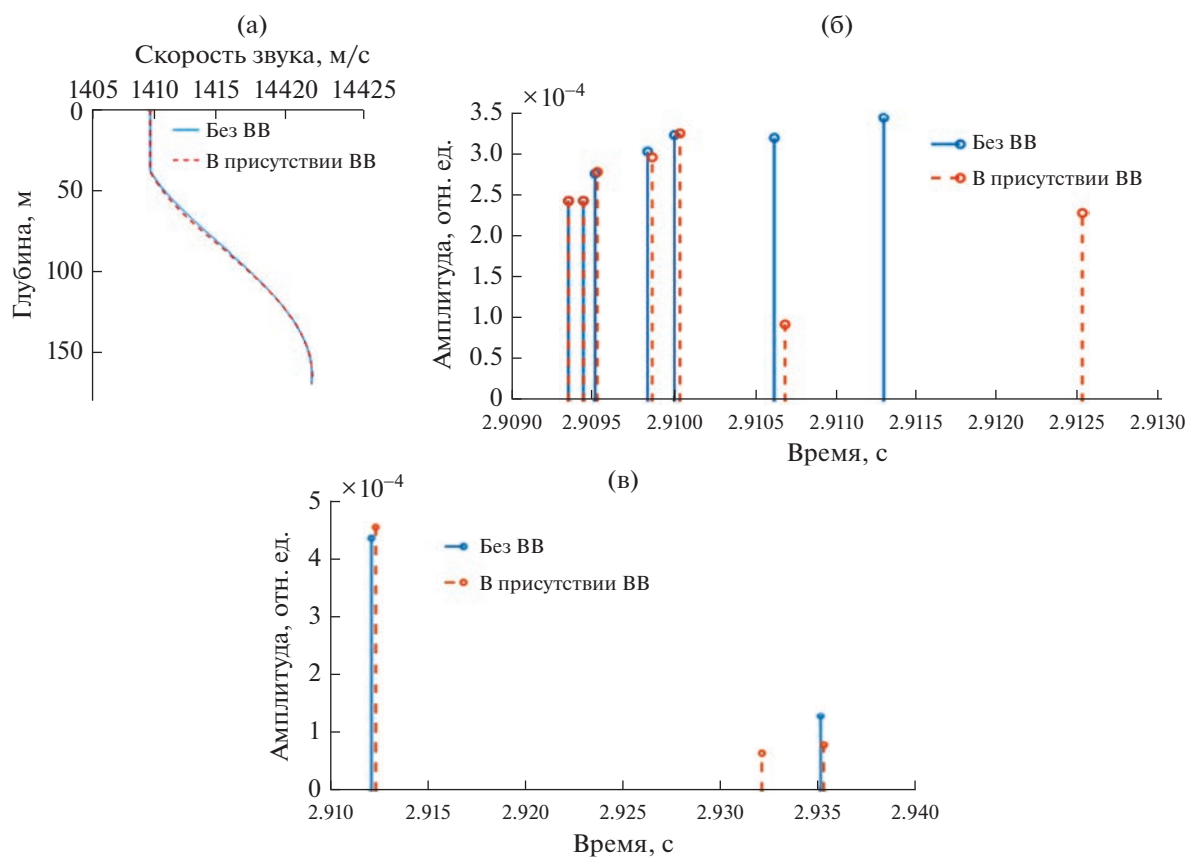


Рис. 6. (а) — Вертикальный профиль скорости звука. (б, в) — Амплитуды сигналов, соответствующих лучам, не взаимодействующим с дном при положении приемника на глубине (б) $z_r = 14$ м и (в) — $z_r = 63$ м.

времена приходов сигналов, определяемые первыми лучевыми приходами без ВВ и при их наличии.

Одной из наиболее вероятных причин возможных вариаций скорости звука в верхнем слое, если таковые имеют место в указанном выше диа-

пазоне Δc_{ef} , могут быть вариации средней температуры в этом слое. Для полученных оценок величины Δc_{ef} возможные флуктуации температуры ΔT за время нашего эксперимента с доверительной вероятностью 90% лежат в ин-

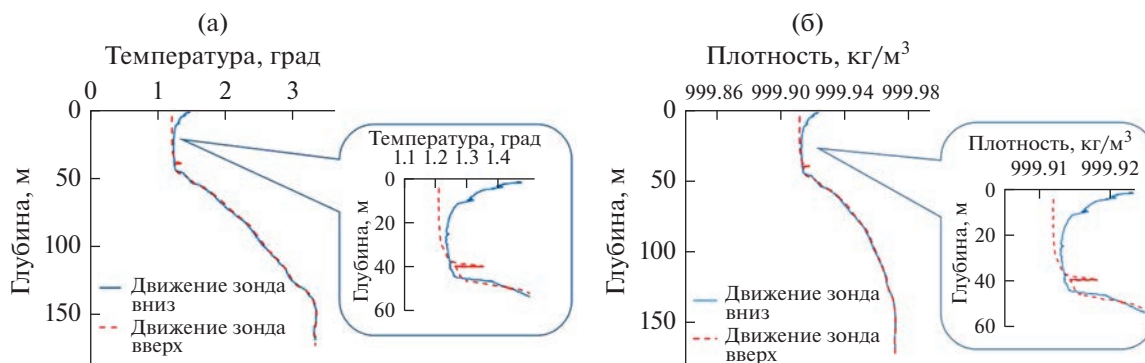


Рис. 7. (а) – Вертикальные профили температуры и (б) – соответствующие им вертикальные профили плотности.

тервале $\Delta T = -0.015...+0.034^{\circ}\text{C}$ (здесь, как и выше, для оценок использованы формулы, приведенные в [3]). Причиной подобных флуктуаций может стать быстрое перемешивание верхнего слоя, вызванное дневным прогревом тонкого приповерхностного слоя воды, непосредственно примыкающего к ледовому покрову. Основанием для такой гипотезы могут служить результаты измерений вертикального профиля температуры, зарегистрированные в точке приема при движении CTD-зонда вверх и вниз в точках расположения приемника и источника звука. Для точки приема результаты показаны на рис. 7а: при движении вниз была зарегистрирована указанная выше теплая прослойка. Наличие такой теплой прослойки говорит о неустойчивом состоянии всего верхнего слоя в случае, когда сверху находится вода с большей плотностью (см. рис. 7б, для которого расчет вертикального профиля плотности воды проводился по методике [6]). При такой неустойчивой стратификации перемешивание воды может происходить очень быстро (в течение десятков секунд [7]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сформулировать ряд методических выводов и рекомендаций по подледному позиционированию АНПА в пресноводных акваториях в весенний период в условиях существования верхнего квазиоднородного водного слоя с характерными вертикальными размерами в десятки метров. Для такого позиционирования на расстояниях в несколько километров достаточно определить эффективную скорость звука в этом слое. Это можно сделать с помощью акустических маяков, расположенных на стабильной ледовой поверхности (ледовый припай) на расстоянии в несколько километров. Маяки должны быть снабжены спутниковой навигационной системой и подводными акустическими транспондерами, находящимися на небольшой глубине в указанном однородном слое.

При стационарном ледовом покрове многократные прецизионные измерения времени распространения сигналов между транспондерами и координат транспондеров позволят оценить искомую среднюю скорость с высокой точностью $\sim \pm 0.1$ м/с. При такой точности измерения возможно определение местоположения АНПА подо льдом в верхнем слое с погрешностью в несколько десятков сантиметров с использованием трех маяков и стандартной методики трилатерации.

Еще одной областью, где могут быть востребованы результаты настоящей работы, является дальняя звукоподводная связь [8, 9], осуществляемая с АНПА подо льдом. Высокая временная устойчивость подледного канала связи должна позволить эффективно использовать алгоритмы подавления межсимвольной интерференции для достижения минимального уровня битовых ошибок даже при работе с одиночными источником и приемником звука.

Отметим также, что к пресноводным акваториям, для которых могут быть важны полученные результаты, можно отнести не только замкнутые водоемы, которым является оз. Байкал. К ним принадлежат и участки океанического шельфа России, примыкающие к устьям великих сибирских рек. Можно предположить, что для этих участков в зимнее время года при стационарном ледовом покрове имеет место стабильный подводный звуковой канал с минимальной временной изменчивостью своих свойств. Изучение такого канала является одной из актуальных задач современной акустической океанографии.

Авторы выражают благодарность М.В. Волкову, К.М. Кучеру, М.М. Макарову и С.М. Першину за помощь в проведении натурных экспериментов и за обсуждение их результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121, <https://rscf.ru/project/22-72-10121/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bhatt E.C., Viquez O., Schmidt H.* Under-ice acoustic navigation using real-time model-aided range estimation // *J. Acoust. Soc. Am.* 2022. V. 151. № 4. P. 2656–2671.
2. *Сорокин М.А., Петров П.С., Каплуненко Д.Д., Голов А.А., Моргунов Ю.Н.* Прогноз эффективной скорости распространения акустических сигналов на основе модели циркуляции океана // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 5. С. 521–532.
3. *Шерстянкин П.П., Колотило Л.Г., Тарасюк Ю.Ф., Куимова Л.Н., Иванов В.Г., Блинов В.В.* О скорости звука в Байкале // *Докл. Акад. наук.* 2002. Т. 386. № 1. С. 103–107.
4. *Porter M.B., Yong-Chun L.* Finite-element ray tracing // *Theoretical and computational acoustics.* 1994. V. 2. P. 947–956.
5. *Гранин Н.Г.* Некоторые результаты измерения внутренних волн на Байкале // В кн. *Гидрология Байкала и других водоемов.* Под редакцией Верболова В.И. Новосибирск: Наука, 1984. С. 67–71.
6. *Millero F.J., Poisson A.* International one-atmosphere equation of state of seawater // *Deep-Sea Res.* 1981. V. 28A(6). P. 625–629.
7. *Першин С.М., Крутянский Л.М., Лукьянченко В.А.* Об обнаружении неравновесных фазовых переходов в воде // *Письма в ЖЭТФ.* 2011. Т. 94. № 2. С. 125–129.
8. *Волков М.В., Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г.* О возможности применения вертикальных приемных антенн для звукоподводной связи на арктическом шельфе // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 3. С. 332–342.
9. *Волков М.В., Луньков А.А., Петников В.Г., Шатравин А.В.* Звукоподводная связь с использованием вертикальных приемных антенн в мелководных акваториях с ледовым покровом // *Океанология.* 2021. Т. 61. № 4. С. 649–661.