

## О ТОЧНОСТИ ОЦЕНОК РАССТОЯНИЯ ПО ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2024 г. Ю. В. Назаренко<sup>a, b, \*</sup>, Д. Д. Сидоров<sup>a, \*\*</sup>, В. Г. Петников<sup>a, \*\*\*</sup>,  
С. В. Писарев<sup>c, \*\*\*\*</sup>, А. А. Луньков<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

<sup>c</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Нахимовский проспект 36, Москва, 117997, Россия

\*e-mail: julnazr@yandex.ru

\*\*e-mail: sidorov.dan.dmit@gmail.com

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

\*\*\*\*e-mail: pisarev@ocean.ru

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

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

В рамках численного моделирования проводятся оценки точности определения расстояния между подводными источниками и приемниками звука, находящимися на расстоянии в несколько километров друг от друга в Карском море в осенний период времени. Предполагается, что основным источником возможных ошибок при определении расстояния является отсутствие точных данных о вертикальном профиле скорости звука на трассе распространения акустических сигналов. Проанализированы данные сентября и ноября, в интервале между которыми имеют место существенные изменения профиля, когда вертикальный градиент скорости звука изменяется от отрицательных значений до положительных. Характерные значения вариаций скорости звука получены при статистической обработке гидрологических данных, взятых из базы World Ocean Database. Полученные результаты важны для анализа возможностей подводной акустической навигации.

*Ключевые слова:* акустика мелкого моря, арктический шельф, подводная навигация

DOI: 10.31857/S0320791924030103 EDN: ZLWBSI

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения широкого класса научно-исследовательских и народнохозяйственных задач начинают широко использоваться автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). К таким задачам относятся наблюдения климатической изменчивости океана, промышленное освоение его шельфа, включая поиск и добычу углеводородного сырья, экологический контроль за антропогенным воздействием на окружающую среду и т.д. Особенно актуальны эти задачи для арктического шельфа России, где сложность их решения обусловлена наличием

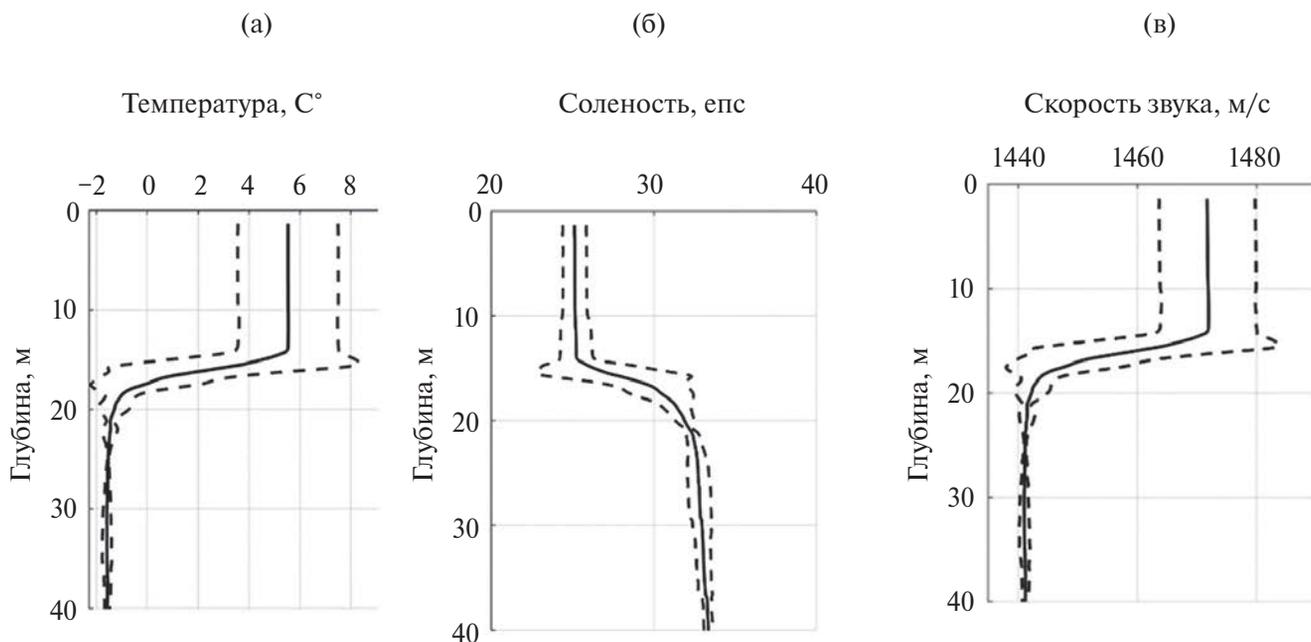
ледового покрова различной сплоченности в течение большей части года. Здесь применение АНПА обещает быть наиболее востребованным и эффективным [1]. Однако эта эффективность во многом определяется возможностями подводной акустической навигации, являющейся основным методом определения координат подводного аппарата в акватории, частично или полностью покрытой льдом [2, 3]. Очевидно, что точность подводной навигации в первую очередь зависит от правильного выбора эффективной скорости распространения звуковых волн [4], которая используется для пересчета времени распространения [5] в расстояние. Важно, что эта скорость определяется

всем вертикальным профилем скорости звука и его горизонтальными пространственными вариациями. При этом указанные вариации, как и сам профиль скорости звука, зависят от района исследований и от времени года. Современные методы навигации используют значения эффективной скорости звука, рассчитанные при помощи численного моделирования с учётом реальных параметров волновода [3, 4].

В настоящей работе приводятся и анализируются результаты статистической обработки гидрологических данных, зарегистрированных в одном из центральных районов Карского моря в осенний период времени. Для сравнительного анализа взяты данные сентября и ноября, в промежутке между которыми вертикальный профиль скорости звука в рассматриваемой акватории претерпевает существенные изменения. Вертикальный градиент скорости звука изменяется от отрицательных значений до положительных. В рамках численных экспериментов для средних профилей с учетом их изменчивости определены возможные диапазоны вариаций времен распространения тестовых акустических сигналов, применяемых при подводной акустической навигации.

## 1. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ИХ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для оценки возможных изменений профиля скорости звука было выбрано два района в центральной части Карского моря, удаленных от берега примерно на 300 км. В одном из районов были измерены гидрологические характеристики морской среды на 6-ти океанологических станциях в начале сентября, а в другом — в начале ноября на 28-ми станциях. Результаты этих измерений вертикальных профилей температуры и солености были взяты из всемирной базы данных [6]. Выбор районов был обусловлен тем фактом, что измерения в каждой серии проводились с борта одного и того же научно-исследовательского судна, что позволяло исключить возможную инструментальную ошибку. Расстояние между районами было равно  $\approx 120$  км. Результаты обработки данных гидрологических измерений показаны на рис. 1 и 2. Сплошной линией показаны средние вертикальные профили. Штриховые линии соответствуют возможным отклонениям от среднего профиля на величину  $\pm 2\sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение, зависящее от глубины).



**Рис. 1.** Вертикальные профили (а) — температуры, (б) — солености и (в) — скорости звука, построенные по данным измерений, проведенных в сентябре. Сплошными кривыми показаны средние профили, штриховыми обозначен диапазон вариаций.

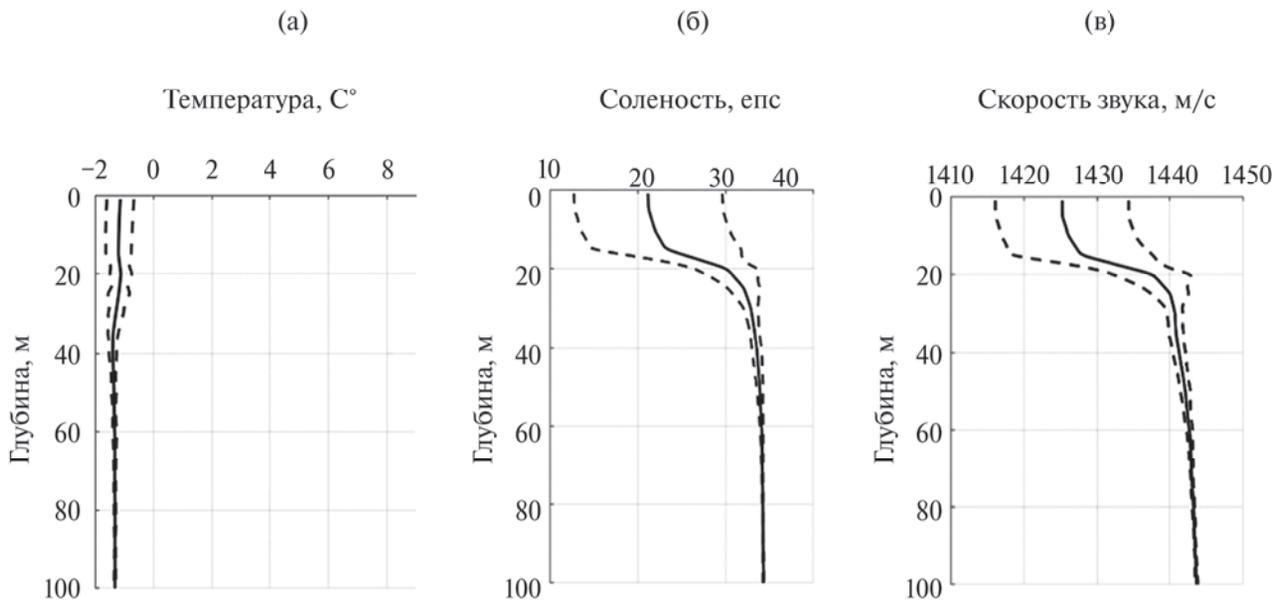


Рис. 2. Вертикальные профили (а) — температуры, (б) — солёности и (в) — скорости звука, построенные по данным измерений, проведенных в ноябре. Сплошными кривыми показаны средние профили, штриховыми обозначен диапазон вариаций.

Вертикальный профиль скорости звука на рис. 1в и 2в вычислялся по формулам, приведенным в работе [7].<sup>1</sup>

На рисунках хорошо заметны типичные особенности гидрологических характеристик в центральной части Карского моря. К ним, в первую очередь, относится наличие приповерхностного распресненного слоя морской воды, обусловленного поступлением в море весной и летом больших объемов пресных вод сибирских рек. Вместе с тем с сентября по ноябрь этот слой претерпевает заметные изменения, влияющие в конечном итоге на вертикальный профиль скорости звука. Среди них следует отметить:

- Фактическое исчезновение термоклина. В ноябре температура воды слабо зависит от глубины, а изменения скорости звука с глубиной в основном связаны с изменением солёности;
- Пространственные изменения температуры и солёности. Для температуры приповерхностного перемешанного слоя в сентябре характерны достаточно большие вариации (единицы градусов) в горизонтальной плоскости, которые заметно уменьшаются (до десятых долей градуса) с приближением зимы. В то же

время аналогичные изменения солёности этого слоя малы в начале осени и увеличиваются в ноябре. В итоге флуктуации скорости звука в горизонтальной плоскости в сентябре обусловлены вариациями температуры, а ближе к зиме такие флуктуации уже связаны с вариациями солёности.

Отмеченные выше изменения характеристик приповерхностного слоя обусловлены двумя причинами. Во-первых, это сезонное понижение температуры воздуха и развитие, в связи с этим, зимней вертикальной циркуляции морских вод. Во-вторых, это резкий сезонный спад объемов поступающих в море вод сибирских рек осенью и зимой.

## 2. МЕТОДИКА И ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При моделировании распространения импульсных акустических сигналов использовалось модовое описание звукового поля, в рамках которого передаточная функция плоскостойкого мелководного акустического волновода записывается в виде [8]:

$$P(\omega) = \sum_m^M \frac{\Psi_m(\omega, z_s) \Psi_m(\omega, z_r)}{\sqrt{\xi_m(\omega)}} \exp(i\xi_m(\omega)r), \quad (1)$$

<sup>1</sup> Отметим, что именно эти формулы, несмотря на всю их громоздкость, рекомендованы ЮНЕСКО для вычисления вертикального профиля скорости звука в морской воде.

где  $\Psi_m(\omega, z)$  — волноводная мода с номером  $m$ , зависящая от частоты  $\omega$  как от параметра,  $\xi_m(\omega)$  — постоянная распространения моды,  $r$  — расстояние между источником и приемником звука,  $z_r$  и  $z_s$  — глубина расположения приемника и источника звука, соответственно. Импульсная характеристика волновода  $h(t)$  определяется как обратное преобразование Фурье от передаточной функции, а акустический сигнал  $s(t)$  на входе приемника представляет собой свертку излучаемого сигнала  $s_0(t)$  с этой характеристикой. Огибающая сигнала на выходе оптимального корреляционного приемника равна:

$$A(\tau) = \left| \hat{H} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s_0(t - \tau) dt \right\} \right|, \quad (2)$$

где  $\hat{H}\{\}$  — оператор, выполняющий преобразование Гильберта<sup>2</sup> над функцией, заключенной в фигурные скобки.

При моделировании выбирались следующие параметры волноводов:

- глубина  $H = 40$  м и профили скорости звука, показанные на рис. 1в (волновод для района, где были проведены измерения в сентябре; здесь подразумевалось, что ледовый покров отсутствует);
- глубина  $H = 100$  м и профили скорости звука, показанные на рис. 2в (волновод для района, где были проведены измерения в ноябре; предполагалось, что на поверхности моря присутствует сплошной ледовый покров толщиной  $l = 1$  м).

Расстояние между источником и приемником звука  $r = 2$  и 5 км. Расчеты проводились при следующих комбинациях глубин источника и приемника:  $z_s = z_r = 8$  м и  $z_s = z_r = 35$  м (волновод в сентябре) и  $z_s = z_r = 8$  м и  $z_s = z_r = 70$  м (волновод в ноябре). Для каждой комбинации выбирались все три профиля скорости звука (сплошная линия и штриховые), показанные на рис. 1в и 2в. Для определенности обозначим эти профили как а) —  $c_-(z)$ , б) —  $c(z)$ , в) —  $c_+(z)$  ( $c_-(z) < c(z) < c_+(z)$ ). Параметры морского дна полагались равными: скорость звука  $c_b = 1600$  м/с, коэффициент затухания звука  $\beta = 0.33$  дБ/λ (λ — длина акустической волны), плотность  $\rho_b = 1850$  кг/м<sup>3</sup>. Передаточная функция рассчитывалась с помощью программы KRAKEN [9]. Моделировалось распространение

сигнала с линейной частотной модуляцией в полосе частот  $f = \omega/2\pi = 1 - 5$  кГц. Длительность сигнала выбиралась равной  $T = 1$  с. Для уменьшения уровня боковых лепестков после корреляционной обработки указанный излучаемый сигнал предварительно сглаживался с использованием окна Хэннинга. Огибающая автокорреляционной функции излучаемого сигнала показана на рис. 3.

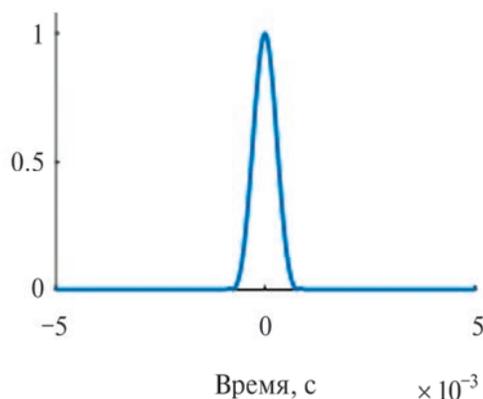


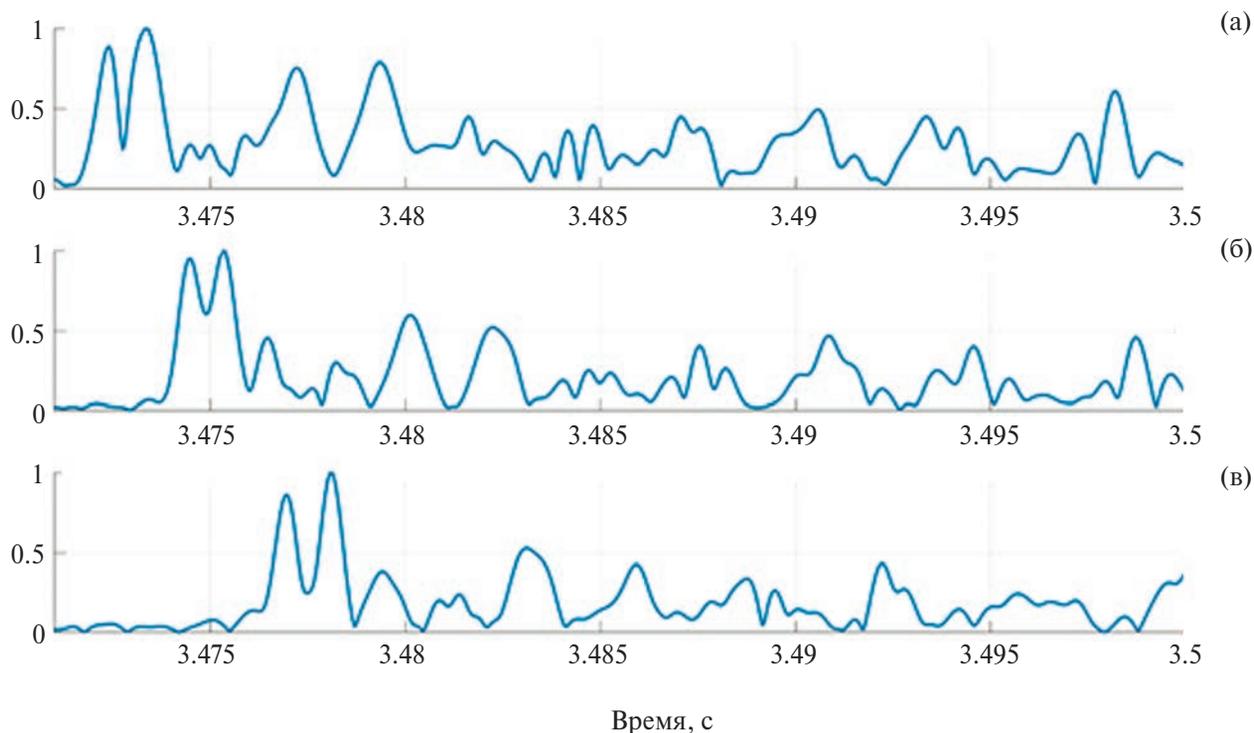
Рис. 3. Огибающая автокорреляционной функции излучаемого сигнала.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

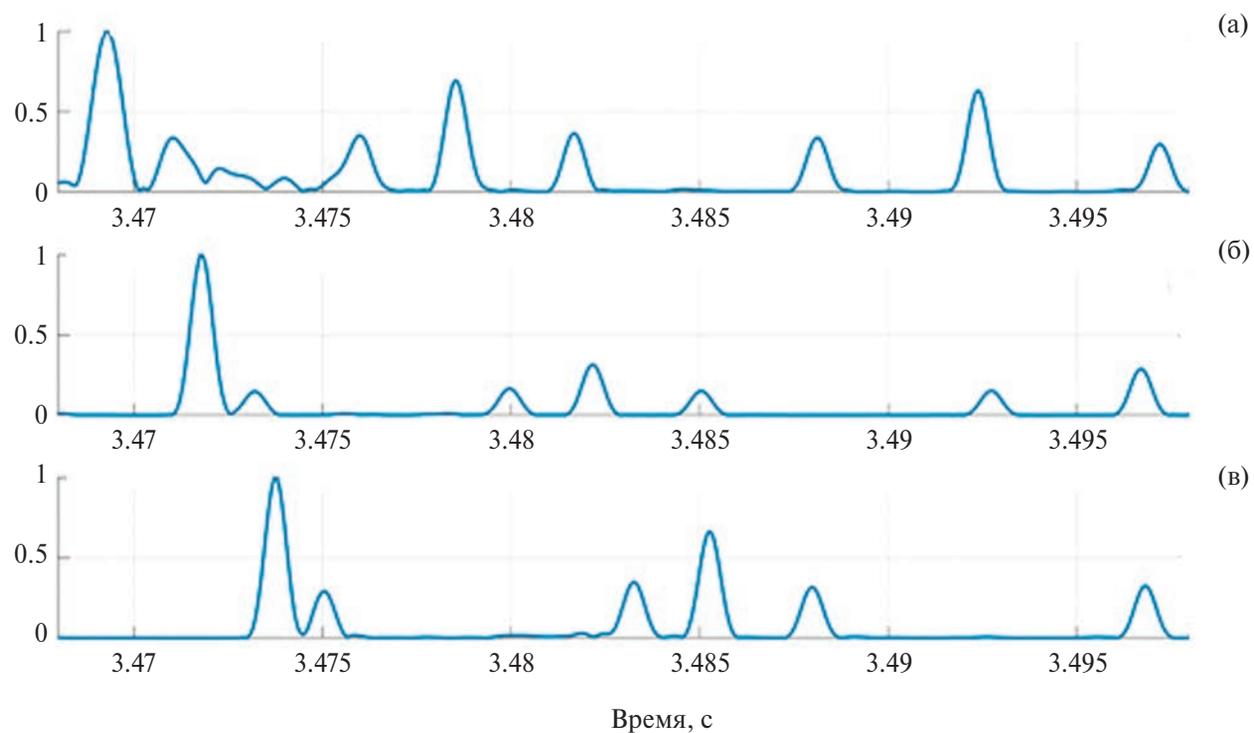
Результаты моделирования для волновода в сентябре показаны на рис. 4 для каждого из профилей скорости звука для расстояния между источником и приемником  $r = 5$  км и для глубины  $z_s = z_r = 35$  м. Аналогичные результаты для ноябрьского волновода для глубины  $z_s = z_r = 70$  м приведены на рис. 5. На этих рисунках с высоким временным разрешением показано лишь несколько импульсов  $A_i(\tau)$  ( $i$  — номер импульса), приходящих первыми и обладающих наибольшей амплитудой. В целом принимаемый сигнал на выходе корреляционного приемника (2) включает в себя более десятка подобных импульсов, и общая длительность сигнала составляет  $\approx 0.45$  с. Увеличение общей длительности сигнала во времени по сравнению с изначальным коротким сигналом (см. рис. 3) обусловлено волноводной дисперсией. При моделировании время распространения сигнала определялось по времени распространения импульса с наибольшей амплитудой.

Результаты оценки времен распространения  $t_c$  для среднего профиля скорости звука  $c(z)$  приведены в табл. 1 и 2 для двух выбранных для анализа волноводов. Значения  $\Delta t_-$  и  $\Delta t_+$  равны разности времен распространения при профилях скорости

<sup>2</sup> Отметим, что преобразование Гильберта использовано здесь для выделения огибающей от несущей частоты.



**Рис. 4.** Принятый сигнал  $A(\tau)$  на выходе корреляционного приемника при профилях скорости звука (а) –  $c_+(z)$ , (б) –  $c(z)$ , (в) –  $c_-(z)$  (сентябрь).



**Рис. 5.** Принятый сигнал  $A(\tau)$  на выходе корреляционного приемника при профилях скорости звука (а) –  $c_+(z)$ , (б) –  $c(z)$ , (в) –  $c_-(z)$  (ноябрь).

Таблица 1. Сентябрьский волновод

Расстояние $r$ , м	Глубина $z_s = z_r$ , м	$\Delta t_- = t_c - t_{c-}$ , с	$t_c$ , с	$\Delta t_+ = t_c - t_{c+}$ , с	Ошибка в определении расстояния $\mp \Delta r$ , м
2000	8	-0.0071	1.3696	+0.0069	-10.4 +10.0
2000	35	-0.0014	1.3925	+0.0012	-1.9 +1.7
5000	8	-0.0119	3.4297	+0.0167	-17.4 +24.3
5000	35	-0.0028	3.4753	+0.0019	-4.0 +2.8

звука  $c_-(z)$  и  $c(z)$ , а также  $c(z)$  и  $c_+(z)$ , соответственно;  $\mp \Delta r = r \Delta t_{\mp} / t_c$  — возможная ошибка в определении дистанции из-за неточного задания зависимости скорости от глубины,  $r/t_c$  — эффективная скорость распространения звука. Здесь следует подчеркнуть, что полученные в таблицах значения ошибки являются грубой оценкой возможных значений погрешностей при определении расстояния. Последнее связано с ограниченностью наших знаний о случайном пространственно-временном поле скорости звука в исследуемой акватории.

Как видно из табл. 1 и 2, точность определения расстояния между подводными источником и приемником звука зависит от их глубины. Точность возрастает почти на порядок при их расположении в придонной части волновода. Данная закономерность имеет место как при относительно теплом приповерхностном слое, так и при относительно холодном. Это факт следует учитывать при построении системы акустической подводной навигации в рассматриваемой акватории. Если же для оценки дистанции по времени распространения использовать не вертикальный профиль и численное

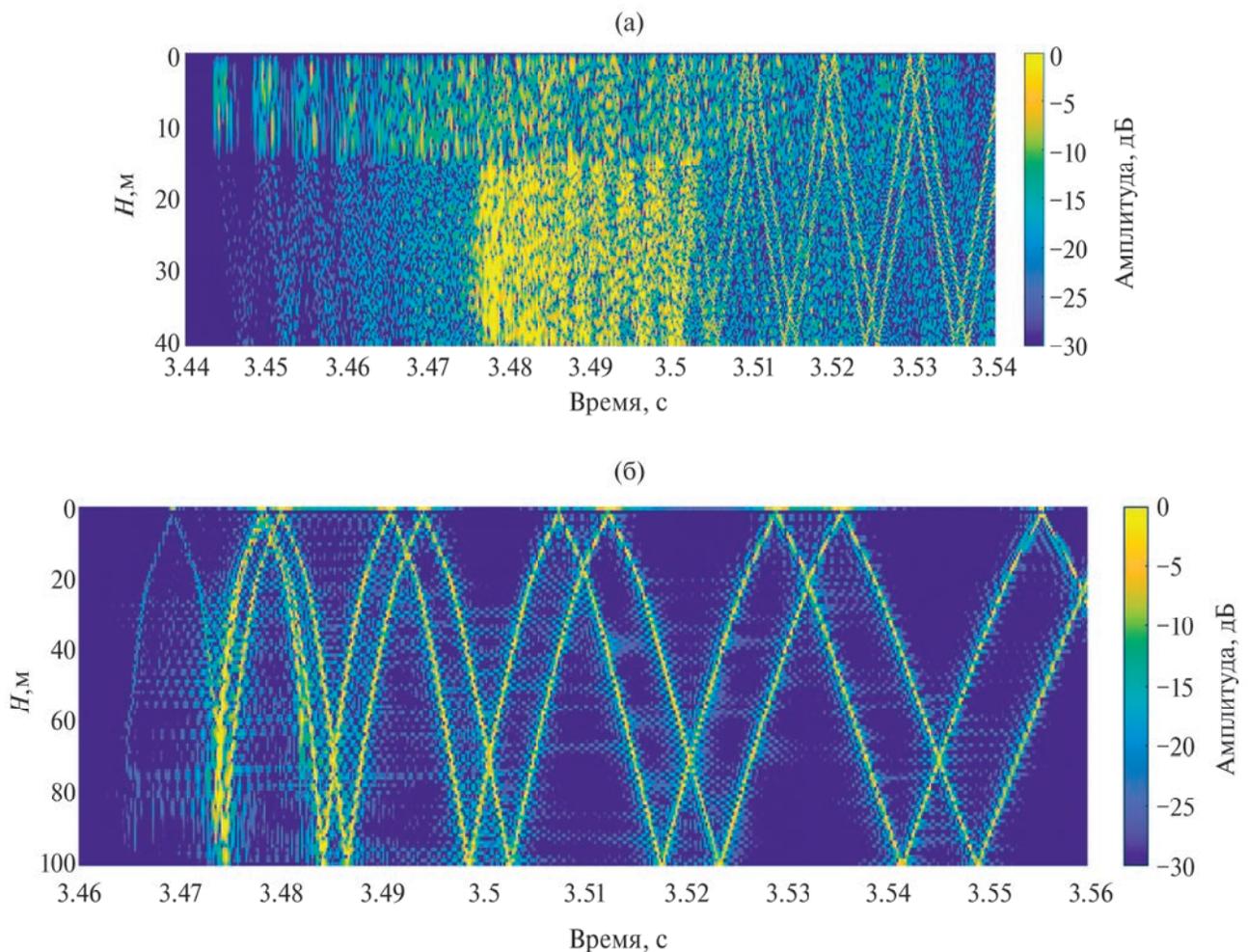
Таблица 2. Ноябрьский волновод

Расстояние $r$ , м	Глубина $z_s = z_r$ , м	$\Delta t_- = t_c - t_{c-}$ , с	$t_c$ , с	$\Delta t_+ = t_c - t_{c+}$ , с	Ошибка в определении расстояния $\mp \Delta r$ , м
2000	8	-0.0138	1.4036	+0.0090	-19.6 +12.3
2000	70	-0.0015	1.3956	+0.0016	-2.1 +2.3
5000	8	-0.0227	3.5086	+0.0225	-32.3 +32.0
5000	70	-0.0020	3.4718	+0.0025	-2.8 +3.6

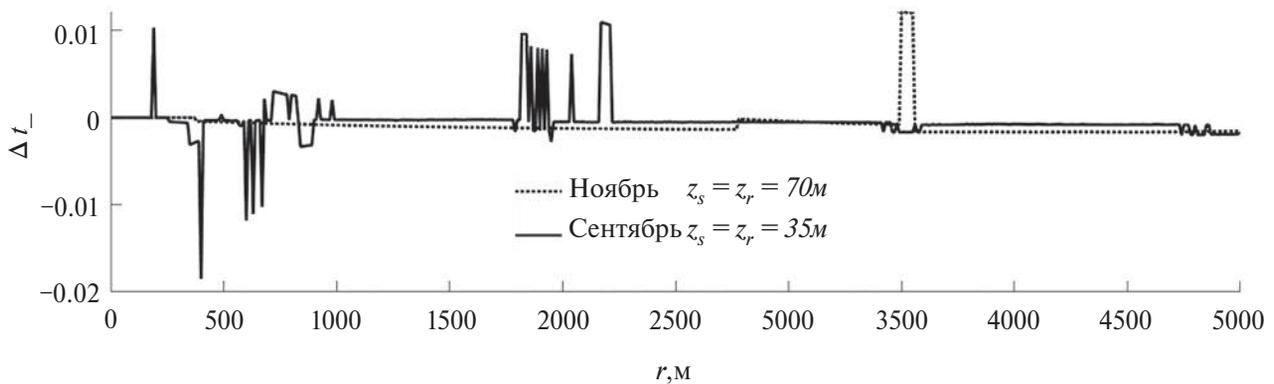
моделирование, а только значение скорости на горизонте нахождения источника и приёмника, то максимальная погрешность возрастает примерно в два раза (до  $\mp \Delta r = 60$  м). Это происходит даже в случае, когда источник и приёмник звука находятся на одной и той же глубине.

Оценим далее еще одну возможную ошибку в определении времени распространения между источником и приёмником звука с помощью описанной выше методики. Регистрируемый импульс с максимальной амплитудой необязательно наблюдается первым, что обусловлено волноводной дисперсией. Более того, в зависимости от расстояния и глубины приема номер такого импульса может измениться, что приведёт к скачкообразному виртуальному (не связанному с изменением расстояния между корреспондирующими точками) изменению времени распространения. На рис. 6

показана расчетная структура регистрируемых сигналов на плоскости глубина приема—время для двух рассматриваемых в работе месяцев. Расстояние между источником и приёмником звука 5000 м. Предполагается, что для сентября источник звука расположен на глубине 35 м, а для ноября — 70 м. Рис. 6 показывает, что в обоих волноводах формируется лучевая структура поля, однако в сентябре (рис. 6а) в приповерхностном слое за счет большей скорости звука время распространения импульсного сигнала уменьшается, и структура принимаемого сигнала плохо разрешается даже на расстоянии 5000 м. Это приводит к упомянутым выше погрешностям в определении времени распространения. Особенно заметен этот эффект на малых расстояниях, где лучевая структура поля и отвечающая ей структура принимаемого сигнала является неразрешимой. Важно отметить, что такого рода погрешности могут превосходить



**Рис. 6.** Структура акустического поля в логарифмическом масштабе при профиле скорости звука  $c_{-}(z)$  (а) — в сентябре и (б) — в ноябре.



**Рис. 7.** Зависимость разности времен распространения  $\Delta t_- = t_c - t_{c-}$  для сентября (пунктирная линия) и ноября (сплошная линия) от расстояния  $r$  между источником и приемником на одной глубине  $z_s = z_r$ .

возможные ошибки, связанные с неопределенностью в выборе профиля скорости звука при оценке расстояния. На рис. 7 в качестве примера показана разность во времени распространения  $\Delta t_- = t_c - t_{c-}$  в зависимости от расстояния. Как видно, обсуждаемые погрешности связаны с параметрами волновода и носят нерегулярный характер в зависимости от расстояния. Очевидно, что они могут быть нейтрализованы при более сложной обработке принимаемого сигнала, когда при определении времени распространения необязательно используется импульс с максимальной амплитудой и применяется траекторное накопление.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ошибки в оценках времени распространения акустических сигналов на арктическом шельфе могут быть также связаны с возможным отсутствием информации о неоднородных параметрах морского дна и случайных пространственно-временных гидродинамических возмущениях морской среды. Если рельеф дна можно определить относительно простым способом, то данные о скорости звука, плотности и коэффициенте затухания акустических волн в морском дне, как правило, бывают неизвестными. Их влияние на возможности подводной навигации требуют дополнительного изучения. Что касается гидродинамических возмущений, то здесь в первую очередь следует учитывать и анализировать короткопериодные внутренние волны. Однако по данным спутниковых наблюдений за морской поверхностью летом и в начале осени [10] интенсивные внутренние волны присутствуют лишь в районах с переменным рельефом дна в области перехода от мелководного шельфа к относительно большим глубинам.

Полученные выше оценки погрешностей при определении расстояния между подводными источниками и приемниками звука в Карском море, по всей видимости, будут примерно такими же и для других арктических морей России, где имеют место аналогичные гидрологические и геоморфологические характеристики: небольшие глубины, ровный рельеф и наличие приповерхностного перемешанного слоя с низкой соленостью. Этот слой формируется не только стоком сибирских рек, но и поступлением менее соленой тихоокеанской воды через Берингов пролив. Для такого слоя характерны заметные вариации параметров в горизонтальной плоскости и, как следствие, значительные погрешности при акустическом позиционировании АНПА на небольших глубинах.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2. С. 5–14.
2. *Barker L.D.L. et al.* Scientific challenges and present capabilities in underwater robotic vehicle design and navigation for oceanographic exploration under-ice // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 16. P. 2588.
3. *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

4. *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.
5. *Петников В.Г., Шатравин А.В., Луньков А.А.* О вариациях времени распространения звуковых сигналов при стационарном ледовом покрове // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 5. С. 569–575.
6. *Boyer T.P., Baranova O.K., Coleman C., Garcia H.E., Grodsky A., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Paver C.R., Reagan J.R., Seidov D., Smolyar I.V., Weathers K., Zweng M.M.* World Ocean Database 2018. Mishonov A.V., Technical Ed. NOAA Atlas NESDIS 87. 2018. [https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod\\_intro\\_0.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod_intro_0.pdf)
7. *Millero F.J., Xu Li.* Comments on equations for the speed of sound in seawater // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. V. 95. № 5. Pt. 1. P. 2757–2759.
8. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана М.: Наука, 2007.
9. *Porter M.* The KRAKEN normal mode program / La Spezia, Italy. SACLANT Undersea Research Centre, 1991. [https://oalib-acoustics.org/website\\_resources/AcousticsToolbox/manual/kraken.html](https://oalib-acoustics.org/website_resources/AcousticsToolbox/manual/kraken.html)
10. *Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Зимин А.В., Шапрон Б.* Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений // *Исслед. Земли из космоса.* 2015. № 4. С. 44–59.

## ON THE ACCURACY OF DISTANCE ESTIMATES BY PROPAGATION TIME OF SOUND SIGNALS ON THE ARCTIC SHELF

**Yu. V. Nazarenko<sup>a, b, \*</sup>, D. D. Sidorov<sup>a, \*\*</sup>, V. G. Petnikov<sup>a, \*\*\*</sup>,  
S. V. Pisarev<sup>c, \*\*\*\*</sup>, A. A. Lunkov<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>**

<sup>a</sup>*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, st. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

<sup>c</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovsky prospect 36, Moscow, 117997, Russia*

As part of numerical modeling, estimates are made of the accuracy of determining the distance between underwater sources and sound receivers located at a distance of several kilometers from each other in the Kara Sea in the autumn. It is assumed that the main source of possible errors in determining the distance is the lack of accurate data on the vertical profile of the sound speed along the propagation path of acoustic signals. Data from September and November were analyzed, in the interval between which significant changes in the profile take place, when the vertical gradient of sound speed changes from negative to positive values. Characteristic values of sound speed variations were obtained by statistical processing of hydrological data taken from the World Ocean Database. The results obtained are important for analyzing the capabilities of underwater acoustic navigation.

*Keywords:* shallow water acoustics, arctic shelf, underwater navigation