

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ НА ПЕРЕСЕКАЮЩИХ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХДАЛЬНИХ ТРАССАХ

Ю.Н. Моргунов, А.В. Буренин, А.А. Голов, М.С. Лебедев, Д.Д. Каплуненко, В.В. Разживин, С.С. Шкрамада

В статье обсуждаются результаты экспериментальных и численных исследований особенностей проведения акустических дальномерных измерений на протяженных трассах при пересечении вихревой системы. На трассе протяженностью 1073 км в северной части Японского моря были проведены гидроакустические и гидрологические измерения, позволившие выявить наличие антициклонического вихря и определить его характеристики по данным гидродинамической модели циркуляции океана NEMO. Для физической интерпретации процессов распространения импульсных широкополосных сигналов в сложных гидрологических и батиметрических условиях были проведены численные исследования с применением вычислительной программы RAY. Это позволило уточнить стандартные методики проведения подобных измерений и повысить точность измерения расстояния между излучателем и приемной системой.

Ключевые слова: гидроакустика, скорость звука, псевдослучайные сигналы, модели циркуляции океана, подводная навигация, антициклонические вихри

Введение

Важнейшим и актуальным направлением технической реализации задач изучения и освоения Мирового океана является разработка и создание подводных робототехнических комплексов (ПРТК) широкого применения. При этом требуется решать вопросы управления, связи и позиционирования для десятков и сотен устройств, выполняющих задачи в заданных районах без всплытия на поверхность, с центром анализа и принятия решений на расстояниях в сотни километров.

С начала 2000-х годов в ТОИ ДВО РАН развернуты поисковые работы по акустической дальнометрии, являющейся основой подводной навигации, на больших расстояниях. Были изучены фундаментальные результаты по особенностям распространения широкополосных импульсных сигналов в различных по природе формирования подводных звуковых каналах (ПЗК). Одним из основных эффектов, кардинально определяющих дальнейшее распространение звука, является эффект акустического «оползья», зафиксированный американскими специалистами [1] вблизи Гавайских островов и неоднократно под-

твержденный авторами статьи для гидрологических условий Японского моря [2–4]. Этот эффект заключается в фокусировке акустической энергии в придонном слое на шельфе, переходе ее на ось ПЗК в глубоком море и распространении по траекториям, близким к прямолинейным, и с минимальным затуханием на большие расстояния. Использование этого эффекта при работе гидроакустических навигационных систем (ГНС) может обеспечить увеличение дальности действия и повышение точности позиционирования, а также расширение функциональных возможностей ГНС. Это обеспечивается использованием в качестве излучаемых сложных сигналов низкочастотного диапазона и возможностью размещения источников навигационных сигналов (ИНС) вблизи побережья [3].

Цель работ, обсуждаемых в статье, заключалась в получении данных для решения задач дальнометрии (навигации) в сложных гидрологических условиях на протяженных (свыше 1000 км) акустических трассах. Рассмотрен случай пересечения трассой вихревой системы с повышенной скоростью звука в ядре. Приведены результаты использования данных гидродинамической модели океана NEMO и численного моделирования.

1. Результаты экспериментальных исследований

Обсуждаемые в статье результаты дальномерных исследований были получены в ходе натурного эксперимента, проведенного в августе 2022 года на акустической трассе Японского моря протяженностью около 1073 км. Эксперимент выполнялся следующим образом. Излучатель располагался в шельфовой зоне у поселка Чехов (о-в Сахалин) на глубине 41 м, на удалении 5 км от свала глубин. Каждые 6 мин излучался фрейм сложных фазоманипулированных сигналов (М-последовательности) с несущей частотой 400 Гц и различными полосами частот. Приемная система на базе радиогидроакустического буя дрейфовала вблизи обеспечивающего судна на удалении 1073 км от излучателя при глубине места около 3 км. Гидрофон приемной системы погружался на ось ПЗК, а принятая сигнальная информация от излучателя поступала

Параметры ПЗК вдоль акустической трассы

№	Дистанция (км)	Мин. скорость звука (м/с)	Глубина (м)
1	0 (излучатель)	1466,025	41,4
2	271,3	1456,678	228,5
3	404,3	1457,067	272,4
4	652,5	1457,567	317,5
5	1073 (приемник)	1457,075	242,9

на поверхностный радиогидроакустический буй и по радиоканалу передавалась на приемное судно. Корреляционная обработка принятых сигналов позволила определить амплитудно-временную структуру приходов акустической энергии сигналов, прошедших от источника до приемника по разным лучевым траекториям, и по последним приходам определялось время прохождения сигналов по кратчайшей, близкой к прямолинейной траектории. Координаты дрейфа ежеминутно фиксировались и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и приемной системой.

В точке приема и в точках на удалениях 271,3, 404,3 и 652,5 км от излучателя производилось измерение вертикального распределения скорости звука и температуры (рис. 1). Анализ этих зависимостей показывает, что ось ПЗК (минимум скорости звука) находилась на глубине около 250 м.

Следует отметить, что в зафиксированных ВРСЗ (см. таблицу) в точках вдоль акустической трассы скорости звука на оси ПЗК близки к значениям 1457 м/с, однако можно заметить увеличение скорости звука и заглубление оси ПЗК в точке 4 на дистанции 652,5 км от излучателя.

При сравнении полученных результатов с данными гидродинамической модели циркуляции океана (NEMO), было обнаружено наличие вихревой системы в точке 4. На участке протяженностью около 100 км фиксируются большие значения скорости звука на оси ПЗК с заметным ее углублением (рис. 2). Наличие вихря подтверждается и данными о рельефе дна (рис. 3), где зафиксировано прохождение

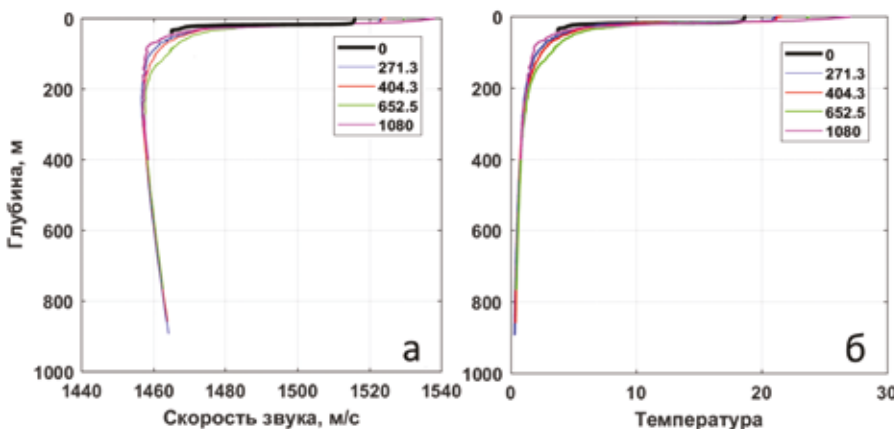


Рис. 1. Измеренные CTD зондом вертикальное распределение скорости звука (а) и температуры (б) по глубине в заданных точках

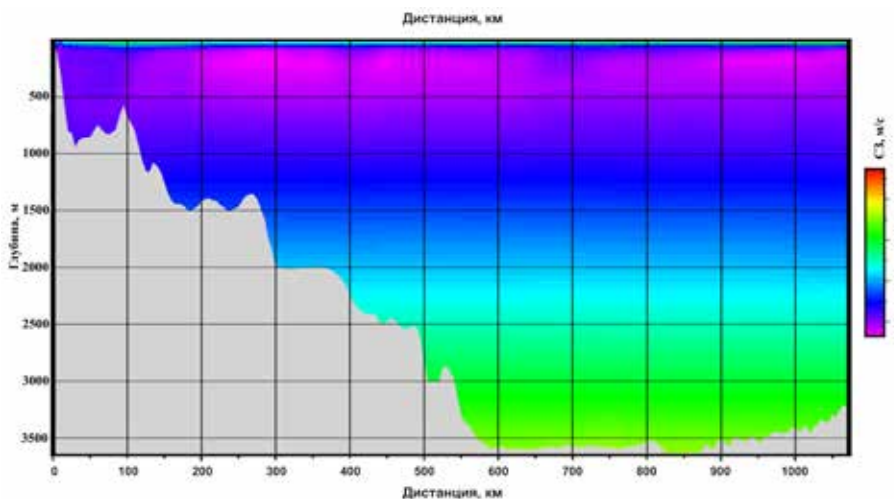


Рис. 2. Поле скорости звука и рельеф дна вдоль акустической трассы. Данные гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и базы данных земной топографии GEBCO

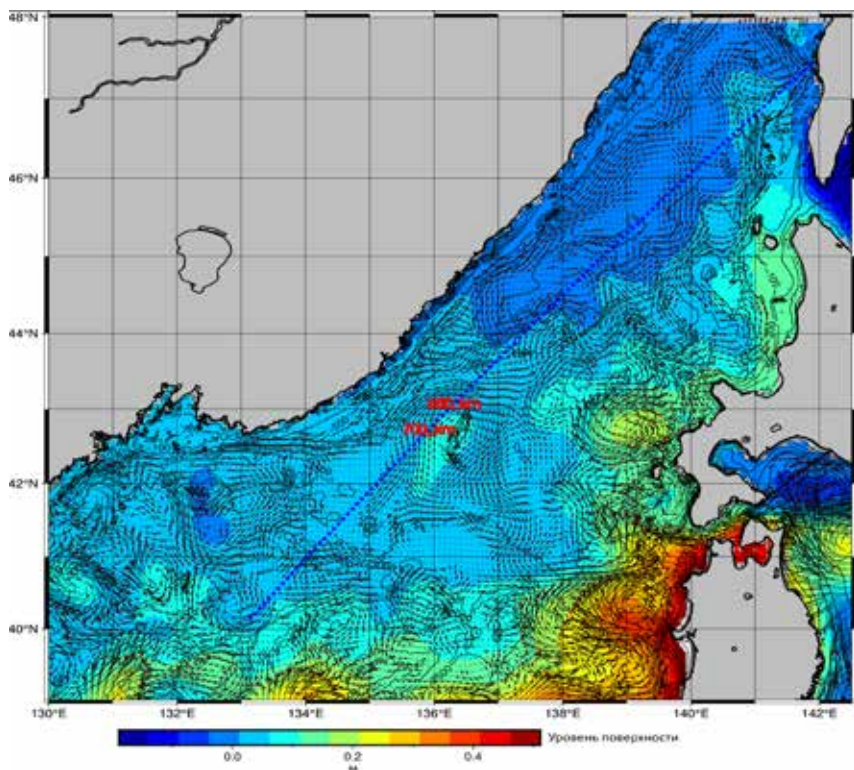


Рис. 3. Рельеф дна и поверхностная циркуляция водных масс по данным гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и базы данных земной топографии GEBCO

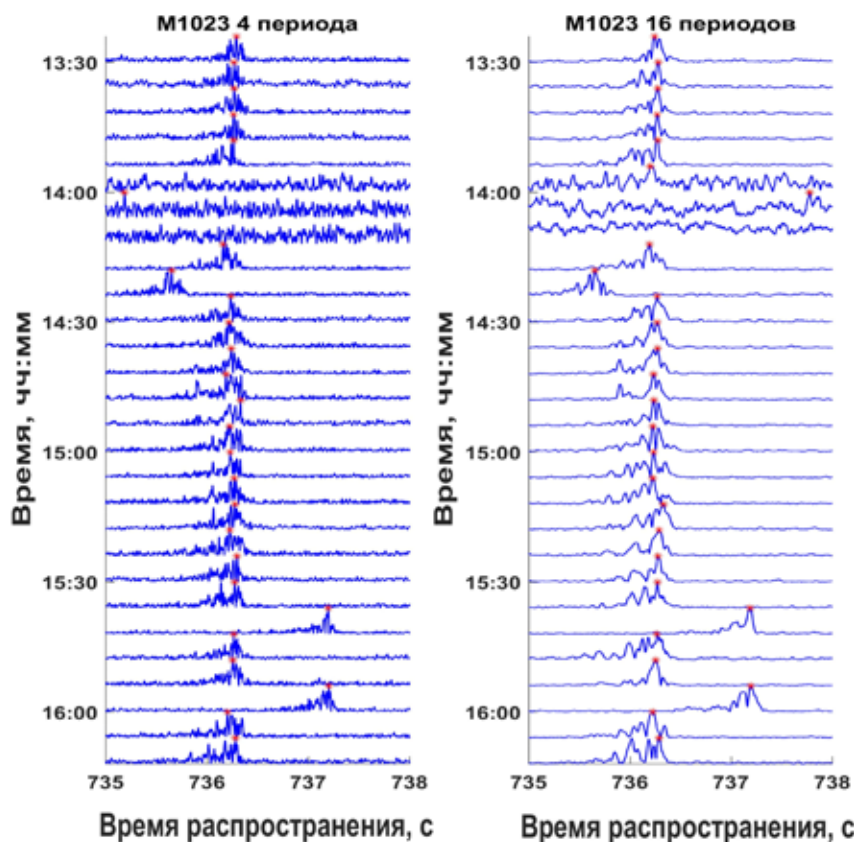


Рис. 4. Импульсные характеристики, полученные с разными длинами символов и количеством периодов на символ

акустической трассы на этом отрезке над возвышенностью Богорова и возможное формирование топографического вихря.

В результате вычисления функций взаимной корреляции (путем свертки принятых сигналов с масками излученных) были получены импульсные характеристики волновода (ИХВ) при разных длинах символов и количествах периодов на символ. На рис. 4 приведены полученные ИХВ, на которых фиксируется стабильная, с заметным превышением над помехой, временная структура импульсных откликов волновода. На всех импульсных характеристиках в одно и то же время (736.3 с) фиксируется последний максимальный приход акустической энергии, распространяющейся по лучевым траекториям вблизи оси ПЗК с минимальной скоростью. Это позволяет рассчитывать на достижение высокой точности определения дистанции при решении ряда навигационных задач.

В нашем случае, если следовать отработанной методике [5–6], основанной на стабильности скорости звука на оси ПЗК, расчет расстояния между излучателем и приемной системой определяется как произведение скорости звука на оси ПЗК в точке приема на время ($1457,075 \times 736,3 = 1072844,3$ м), т.е. ошибка составит 155,7 м. Это связано с тем, что средняя скорость звука на трассе выше за счет наличия теплового антициклонического вихря и составляет $1073000 \text{ м} / 736,3 \text{ с} = 1457,28 \text{ м/с}$.

В данном случае ошибка определения расстояния между излучателем и приемной системой может быть уменьшена путем предварительной калибровки диагностируемой акватории. Для этого перед началом миссии ПТРК должна быть определена эффективная скорость звука ($1073000 \text{ м} / 736,3 \text{ с} = 1457,28 \text{ м/с}$) и в дальнейшем использоваться в расчетах.

2. Результаты численного моделирования

Для физической интерпретации полученных результатов было проведено численное моделирование процесса распространения широкополосных импульсных сигналов с использованием хорошо зарекомендовавшей себя в предыдущих работах [2] программы RAY. При использовании полученных экспериментально исходных данных по гидрологии были получены результаты, которые позволяют качественно и количественно оценить процесс формирования акустического поля на заданной трассе и импульсного отклика волновода (рис. 5, а, б, в, г). На смоделированной лучевой картине при незначительной подгонке данных (поле скорости звука на участке предполагаемого вихря соответствует ВРСЗ в точке 4, и размер вихря составляет 132 км) фиксируется захват акустической энергии вдоль оси ПЗК, схожий с данными NEMO (рис. 2 и 5, б). Очень важно, что полученная расчетным путем ИХВ (5, г) соответствует экспериментальной (5, д) и, следовательно, данная модель может быть использована при рассмотрении различных практических вариантов миссий ПТРК в данной акватории.

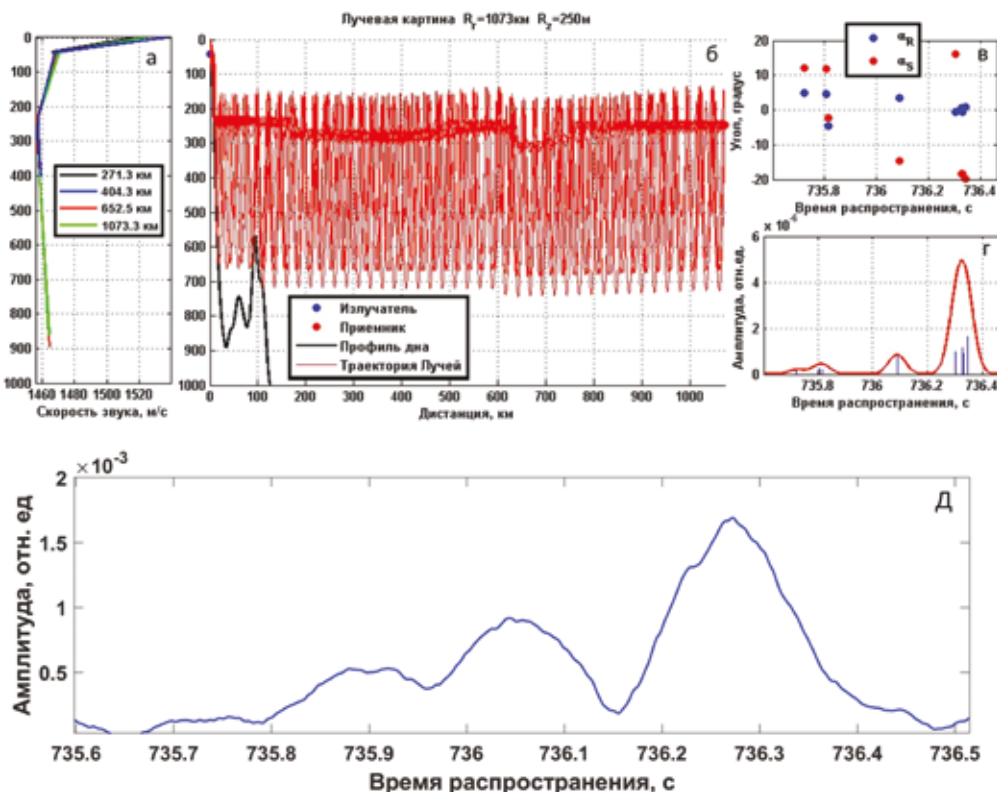


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования распространения сигнала с реально полученными ИХВ: а – ВРСЗ в точках вдоль трассы; б – лучевая картина распространения акустических сигналов для малых углов излучения; в – углы выхода и прихода; г – модель приходов акустических сигналов и формы импульсной характеристики; д – экспериментально полученная импульсная характеристика для сигнала M127

Выводы

Результаты исследований продемонстрировали уникальные свойства ПЗК на протяженной трассе, которые обеспечивают высокоточные дальномерные измерения с ошибкой не более 155,7 м. Но при этом обнаружение и классификация антициклонического вихря на трассе позволяют повысить точность измерений путём проведения предварительной калибровки акватории.

Предварительные исследования гидрологической обстановки в районе проведения измерений с применением гидродинамической модели циркуляции океана NEMO позволяют обнаружить вихревые неоднородности и определить необходимые для учёта в расчетах расстояний их характеристики.

Показана эффективность применения вычислительной программы RAY для восстановления и физической интерпретации процесса формирования импульсного отклика диагностируемого волновода по данным модели NEMO и измеренному ВРСЗ в точках излучения и приема сигналов.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН: «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных

акустических систем» (регистрационный номер: АА-АА-А20-120031890011-8). Анализ и интерпретация результатов проводились в рамках проекта «Научно-методическое обеспечение выполнения работ «Обоснование системы климатического мониторинга дальневосточных морей и разработка методов мониторинга экстремальных погодно-климатических явлений, связанных с океаном, на основе стационарных и мобильных измерительных комплексов, а также мультисенсорного спутникового зондирования», направленных на обеспечение выполнения мероприятий Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // J. Acoust. Soc. Am. 2002. Vol. 111. P. 757–762.
2. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2016. Т. 62, № 3. С. 341–347.
3. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Буренин А.В., Петров П.С. Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 5. С. 641–649.
4. Петров П.С., Голов А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Козицкий С.Б., Сорокин М.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространения импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море // Акустический журнал, 2020. Т.66, № 1, с.20-33.
5. Лучин В.А., Голов А.А., Шешегов А.В., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н. Использование массивов многолетних океанологических данных и опорных гидроакустических сигналов для уточнения методики расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море. // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 4(36). С. 4–17.
6. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Лучин В.А., Дубина В.А. Методология применения океанологических данных для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2(26). С. 49–54.

Сведения об авторах

МОРГУНОВ Юрий Николаевич, с.н.с., зав. лаб. 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь

Тел. +7(423)2311-400

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1961-1915>

БУРЕНИН Александр Викторович, с.н.с. лаборатории 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, цифровая обработка сигналов, подводная навигация, подводная связь.

Тел. +7(423)2311-400

E-mail: shurick_burenin1@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0062-4510>

ГОЛОВ Александр Александрович, с.н.с. лаборатории 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь, цифровая обработка сигналов.

Тел. +7(423)2311-400

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7160-0076>

ЛЕБЕДЕВ Михаил Сергеевич, с.н.с. лаборатории 6/1 – Океанотехники

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь, цифровая обработка сигналов.

Тел. +7(423)2311-400

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6859-2001>

КАПЛУНЕНКО Дмитрий Дмитриевич, с.н.с. лаборатории 1/1 – Физической океанологии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: климатические изменения, точные инструментальные измерения in situ, машинное обучение, гидродинамическое моделирование

Тел. +7(4232)311-400

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7791-6733>

РАЗЖИВИН Василий Валентинович, ст. инженер лаборатории 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь,

Тел. +7(4232)311-400

E-mail: rvs@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-6322>

ШКРАМАДА Сергей Сергеевич, Инженер лаборатории 6/1 – Океанотехники

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь,

Тел. +7(4232)311-400

E-mail: shkramada.ss@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0229-4797>

PECULIARITIES OF HYDROACOUSTIC RANGING ON ULTRA-LONG PATHS CROSSING VORTEX STRUCTURES

Yu.N. Morgunov, A.V. Burenin, A.A. Golov, M.S. Lebedev, D.D. Kaplunenko, V.V. Razzhivin, S.S. Shkramada

The article discusses the results of experimental and numerical studies of the features of acoustic ranging measurements on long paths when crossing a vortex system. Hydroacoustic and hydrological measurements were carried out along a 1073 km track in the northern part of the Sea of Japan, which made it possible to reveal the presence of an anticyclonic eddy and determine its characteristics according to the NEMO ocean circulation hydrodynamic model. For the physical interpretation of the processes of propagation of impulse broadband signals in complex hydrological and bathymetric conditions, numerical studies were done using the RAY computer program. Thus, it becomes possible to refine the standard methods for carrying out such measurements and improve the accuracy of measuring the distance between the emitter and the receiving system.

Keywords: hydroacoustic, speed of sound, pseudorandom signals, ocean circulation models, underwater, anticyclonic eddy

References

1. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source. *J. Acoust. Soc. Am.* 2002. Vol. 111. P. 757–762.
2. Morgunov, Y.N., Bezotvetnykh, V.V., Burenin, A.V. et al. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water. *Acoust. Phys.* 2016. Vol. 62. P. 350–356. <https://doi.org/10.1134/S1063771016030118>
3. Morgunov, Y.N., Golov, A.A., Burenin, A.V. et al. Studies of Spatiotemporal Structure of the Acoustic Field Formed in Deep Water by a Broadband Pulsed Signal Source on the Shelf of the Sea of Japan // *Acoust. Phys.* 2019. Vol. 65. 537–544. <https://doi.org/10.1134/S1063771019050166>
4. Petrov, P.S., Golov, A.A., Bezotvetnykh, V.V. et al. Experimental and Theoretical Study on Arrival Times and Effective Velocities in the Case of Long-Range Propagation of Acoustical Pulses Along the Shelf Edge in a Shallow Sea. *Acoust. Phys.* 2020. Vol. 66, 21–32 <https://doi.org/10.1134/S106377102001008X>.
5. Luchin V.A., Golov A.A., Sheshegov A.V., Dubina V.A., Morgunov YU.N. Application of long-term arrays of oceanological data and reference hydroacoustic signals for refining the method of calculating the effective sound speed on acoustic paths in the Sea of Okhotsk. *Underwater exploration and robotics.* 2021. No. 2(36). P. 4–17.
6. Luchin V.A., Golov A.A., Dubina V.A., Morgunov Yu.N. Methodology of the oceanological data application in high accuracy observation of underwater objects at long distances. *Underwater exploration and robotics.* 2018. No. 2(26). P. 49–54.



About the authors

MORGUNOV Yury Nikolaevich, Senior Researcher, Head of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: hydroacoustic, acoustic tomography, underwater navigation, underwater communications.

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1961-1915>

BURENIN Aleksandr Victorovich, Senior Researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: hydroacoustic, digital signal processing, underwater navigation, underwater communications.

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: shurick_burenin1@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0062-4510>

GOLOV Aleksandr Aleksandrovich, Senior Researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: hydroacoustic, digital signal processing, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7160-0076>

LEBEDEV Mikhail Sergeevich, Researcher of the laboratory 6/1 – Ocean Research Equipment Development

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: hydroacoustic, digital signal processing, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6859-2001>

KAPLUNENKO Dpmitrii Dmitrievich, Senior Researcher of the laboratory 1/1 – Physical oceanology

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: climate change, accurate in situ instrumental measurements, machine learning, hydrodynamic modeling

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7791-6733>

RAZZHIVIN Vasilii Valentinovich, Senior engineer of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: hydroacoustic, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

E-mail: rvs@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-6322>

SHKRAMADA Sergei Sergeevich, Engineer of the laboratory 6/1 – Ocean Research Equipment Development

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: hydroacoustic, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: shkramada.ss@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0229-4797>

