

ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА СВЕРХДАЛЬНИХ ДИСТАНЦИЯХ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

А.А. Голов, М.С. Лебедев, В.В. Безответных, Д.С. Стробыкин, М.А. Сорокин, М.В. Будянский

В статье обсуждаются результаты, полученные, при выполнении пилотного акустико-гидрологического эксперимента в августе 2022 года на трассе от побережья о-ва Сахалин до банки Кита-Ямато в Японском море. Представлена методология комплексных исследований, предназначенных для изучения климатической изменчивости температурных режимов на акватории. Основу методологии составляет комбинирование методов акустической термометрии, данных натурных STD-промеров и данных моделей циркуляции океана NEMO. По результатам 112 акустических измерений сделана оценка средней по трассе температуры на глубине залегания подводного звукового канала. Эта величина может использоваться для оценки влияния глобального потепления на температурные режимы в исследуемой акватории. Произведена оценка влияния двух вихревых образований, пересекающих акустическую трассу, на распространение широкополосных фазоманипулированных сигналов.

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, модели циркуляции океана, импульсная характеристика, локализация вихревых образований

ВВЕДЕНИЕ

Использование акустических сигналов для зондирования морской среды с целью восстановления ее параметров насчитывает не один десяток лет. В качестве одного из первых экспериментов, использующих данную методологию в океанических масштабах, можно привести The 1960 Perth to Bermuda Experiment [1]. В 1960 году было обнаружено, что звук, зарождающийся от взрывов, у порта Перта, Австралия, был зарегистрирован на Бермудских островах в Северной Атлантике. При этом длина трассы составила чуть менее 20000 км. Этот уникальный эксперимент привел к интересной идее использования акустических сигналов на очень больших расстояниях в океане для измерения небольших изменений средней температуры океана. Такие измерения позволяют отслеживать изменения температурных режимов океанов, вызванных глобальным изменением климата. Ввиду того что скорость звука (СЗ) напрямую зависит от температуры среды, при изменении температуры на 1°C СЗ меняется примерно на 4 м/с. Определяя время прохождения акустических импульсов и зная расстояние между источником и приемником, можно вычислить скорость распро-

странения импульсов и ее изменение в долгосрочной перспективе. Изменение скорости, в свою очередь, может быть использовано для определения изменения температуры океана. Методология океанической акустической томографии впоследствии была разработана в 80-е годы в работах американских специалистов [2–4]. Было установлено, что изменения средней температуры океана в результате изменения климата составляют примерно 0,005°C в год на глубине 1000 м. Позднее результаты этих наработок привели к реализации программы по акустической термометрии океанического климата (АТОС) [5–8], в рамках которой в течение пяти лет проводились зондирования тихоокеанской акватории по трассам длиной до 5000 км. Регистрация времени прохождения сигналов обеспечивала прямые трехмерные измерения горизонтальной и вертикальной средней температуры вдоль акустических трасс, подавляя эффекты мелкомасштабной изменчивости океана, которые вносят существенный вклад при прямых измерениях в точке. Преимущество акустической термометрии по сравнению с другими типами измерения температуры заключается в том, что средние значения лучшим образом подходят для изучения крупномасштабной изменчивости океана и долгосрочных трендов вари-

ации температуры океана. Анализ данных проекта АТОС показал, что акустическая термометрия является мощным инструментом для проведения долгосрочных измерений крупномасштабной изменчивости температуры.

Поскольку поверхностные температуры имеют тенденцию к снижению к географическим полюсам, ось звукового канала обычно более заглублена в тропических водах и менее в арктических водах. Типичные заглубления звукового канала в Японском, Охотском морях, например, составляют 100–300 м, но в более теплых районах они намного глубже, порядка 750–1000 м. И если для изучения последних проведено достаточно исследований специалистами из США, то для акваторий умеренных широт их крайне мало.

Основываясь на вышеперечисленных разработках и собственном опыте лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО РАН [9–13], в августе 2022 года был проведен пилотный эксперимент по акустической термометрии на трассе в Японском море длиной 1073 км с привлечением данных модели циркуляции океана NEMO [14] и лагранжевой карты длин траекторий пассивных маркеров для Японского моря по данным поля скорости AVISO [15–16].

■ Схема эксперимента

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Постановка приемной системы вблизи банки Кита-Ямато, а излучателя вблизи побережья порта Чехова реализует сценарий, при котором сигналы сначала распространяются в придонном слое шельфового участка, затем под воздействием эффекта оползня происходит перекачка энергии и дальнейшее распространение с наименьшими потерями вдоль оси подводного звукового канала (ПЗК). Важным обстоятельством выбора такой схемы измерений является тот факт, что акустическая трасса проходит в направлении с севера на юг почти через всю экономическую зону РФ в Японском море.

Излучатель был расположен на глубине 41 м и на удалении 5 км от свала глубин. Каждые 6 минут излучался фрейм, в состав которого были включены 6 фазоманипулированных псевдослучайными M-последовательностями сигналов, сигналы с высоким временным разрешением: длиной

1023 символа с заполнением 4 и 16 периодов несущей частоты на символ (далее M1023 и M1023_16) и 2047 символов с 8 периодами на символ (далее M2047); сигналы с низким временным разрешением: длиной 127 символов с заполнением 40 и 100 периодами несущей частоты на символ (далее M127 и M127_100) и последовательность Баркера с 400 периодами на символ. Все сигналы имели несущую частоту 400 Гц, при этом различались по полосе занимаемых частот $\Delta f = f \pm \frac{f}{l}$ и временному разрешению $\tau = \frac{l}{f}$, где f – центральная частота, l – количество периодов на символ последовательности.

Акустическое давление составляло около 8000 Па на 1 метре от излучателя. Приемная система на базе радиогидроакустического буя дрейфовала вблизи обеспечивающего судна на удалении около 1073 км от излучателя при глубине места около 3 км (рис. 1).

Гидрофон приемной системы погружался на ось ПЗК, которая определялась при измерении вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). При-



Рис. 1. Схема проведения пилотного эксперимента в Японском море

нятая сигнальная информация от излучателя поступала на поверхностный радиогидроакустический буй и по радиоканалу передавалась на приемное судно, где проводилась ее первичная обработка и сохранение на жестком диске персонального компьютера.

$$\Delta L = 2\pi d \frac{L}{4 \times 10^7},$$

где L – дистанция между точками излучения и приема на уровне моря, м; 4×10^7 – средняя длина окружности Земли на уровне моря, м; d – глубина оси ПЗК, м.

■ Результаты акустической термометрии

На рис. 2–3 приведены импульсные характеристики волновода, которые были получены в результате свертки принятых сигналов с излученными.

Следует отметить, что на подавляющем большинстве импульсных характеристик фиксируется последний максимальный приход акустической энергии, распространяющейся по лучевым траекториям вблизи оси ПЗК с минимальной скоростью.

Координаты дрейфа буя ежесекундно фиксировались системой GPS и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и приемной системой (рис. 4). На каждый момент прихода акустического сигнала рассчитывалась дистанция от источника до приемника. Расчет дистанции производился с помощью алгоритма [17] по GPS данным источника и приемника с учетом заглубления оси ПЗК. Поправка в расчете обуславливается уменьшением радиуса Земли при заглублении ниже уровня моря и, как следствие, уменьшением длины дуги, соединяющей корреспондирующие точки. Величина поправки ΔL определяется как:

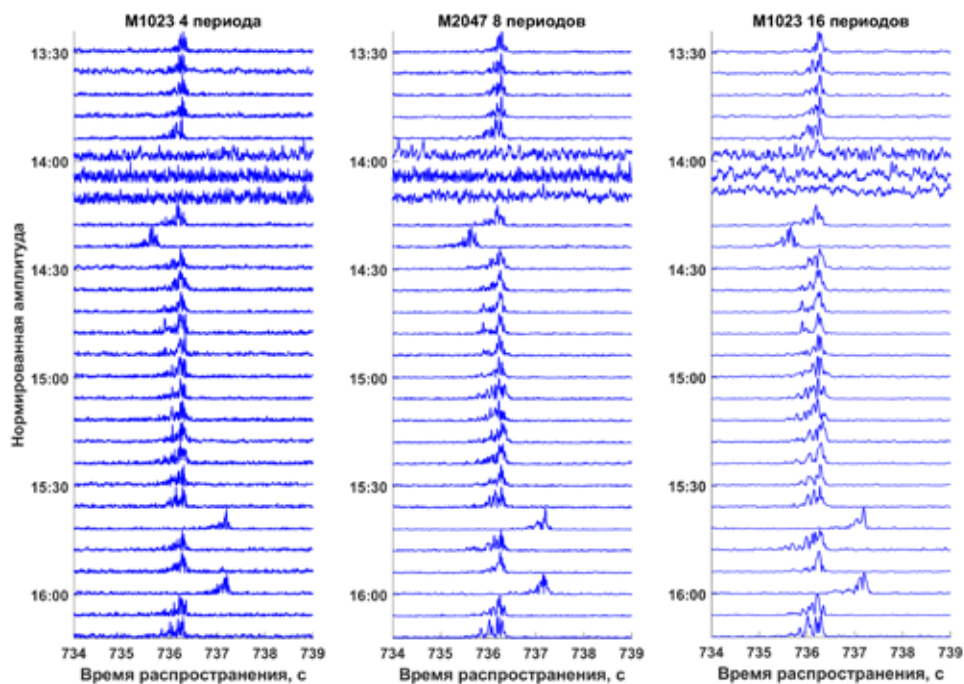


Рис. 2. Импульсные характеристики сигналов с высоким временным разрешением

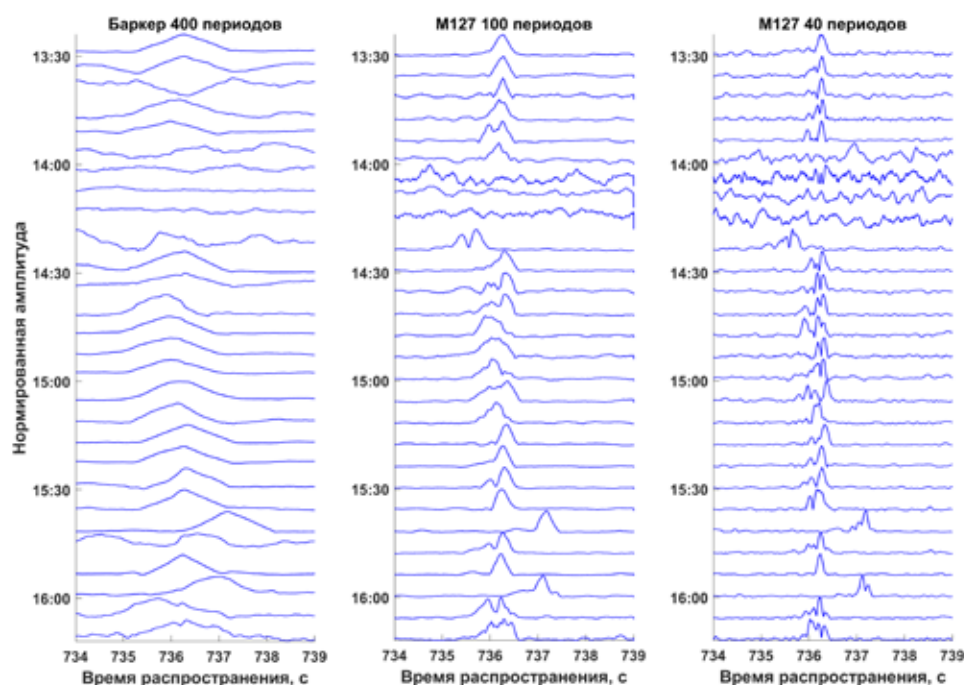


Рис. 3. Импульсные характеристики сигналов с низким временным разрешением

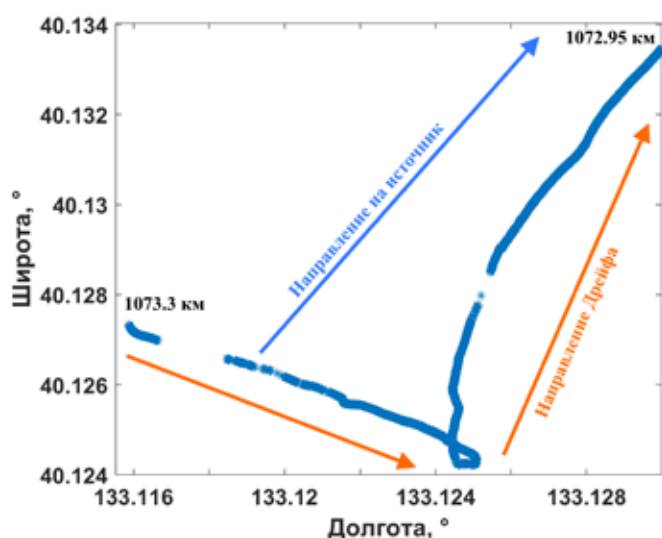


Рис. 4. Траектория дрейфа приемной системы с изменением дистанции до источника

Для дистанций между точками излучения и приема в диапазоне 1072.950 – 1073.3 км (рис. 4) и глубины оси ПЗК 250 м поправка равна 42 м.

Далее, по данным координат буя и измеренному времени, рассчитывалась средняя скорость звука на каждый момент дрейфа, причем для расчета использовались только импульсные характеристики сигналов с самыми высокими временными разрешениями (M1023, M2047, M127). Из полученной средней по трассе скорости звука, известных величин глубины залегания оси ПЗК (250 м) и солёности (34.1 ‰) по общепринятому в океанологии алгоритму Чена–Миллера [18] рассчитывалась температура (рис. 5).

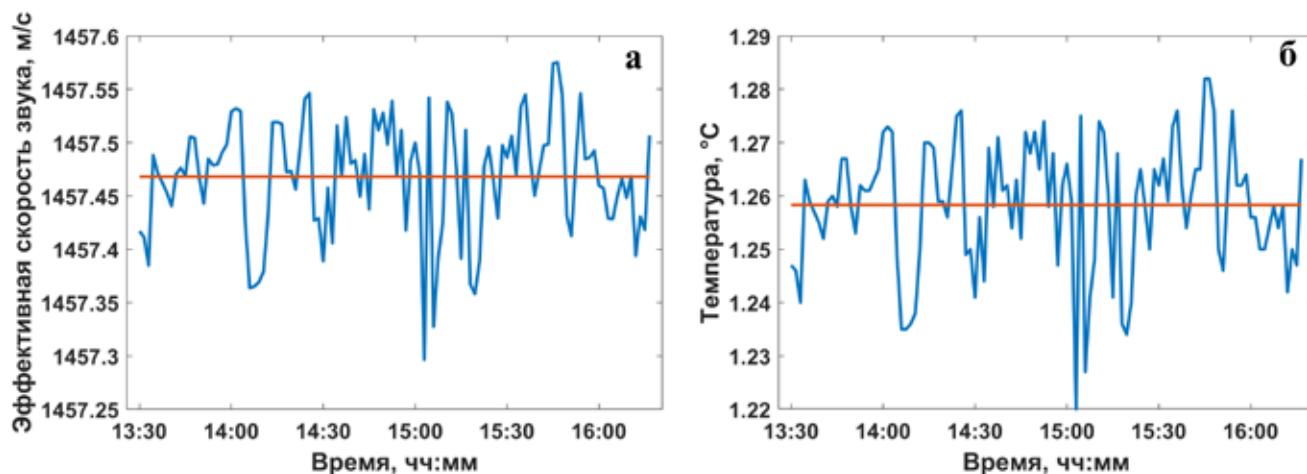


Рис. 5. Скорость звука(а) и температура(б) на оси ПЗК, рассчитанные по последнему приходу акустических сигналов (синий – измерения по каждому зарегистрированному сигналу, красный – среднее значение по всем измерениям)

Таким образом, инструментальные акустические измерения величины средней температуры на оси ПЗК по 112 оценкам на тысячекilометровой акустической трассе показали значение 1,258 °С со среднеквадратичным отклонением 0,012 °С.

■ Гидрологическая обстановка в районе исследований

В рамках пилотного акустико-гидрологического эксперимента дополнительно проводились STD-зондирования вблизи приемной системы и в точках на удалениях 271,3, 404,3 и 652,5 км (рис. 6, а, б). Анализ этих зависимостей показывает, что ось ПЗК (минимум скорости звука) во всех точках находилась на глубине от 200 до 300 м, а в слоях выше оси скорость звука и температура повышались с приближением к приемной системе.

Кроме того, можно отметить большее значение скорости звука и большее заглубление оси ПЗК в точке № 4 на удалении от излучателя 652,3 км.

Для более полного анализа гидрологической обстановки в районе исследований были использованы данные гидродинамической модели циркуляции океана NEMO о полях скорости звука на данной трассе и в данный промежуток времени. На рис. 7 отчетливо фиксируется отрезок от 600 до 700 км, на котором отмечаются большие значения скорости звука на оси ПЗК и большие глубины ее залегания. Это соответствует данным, полученным с STD (красные точки на рис.7), и позволяет предположить наличие на этом участке трассы вихревой системы.

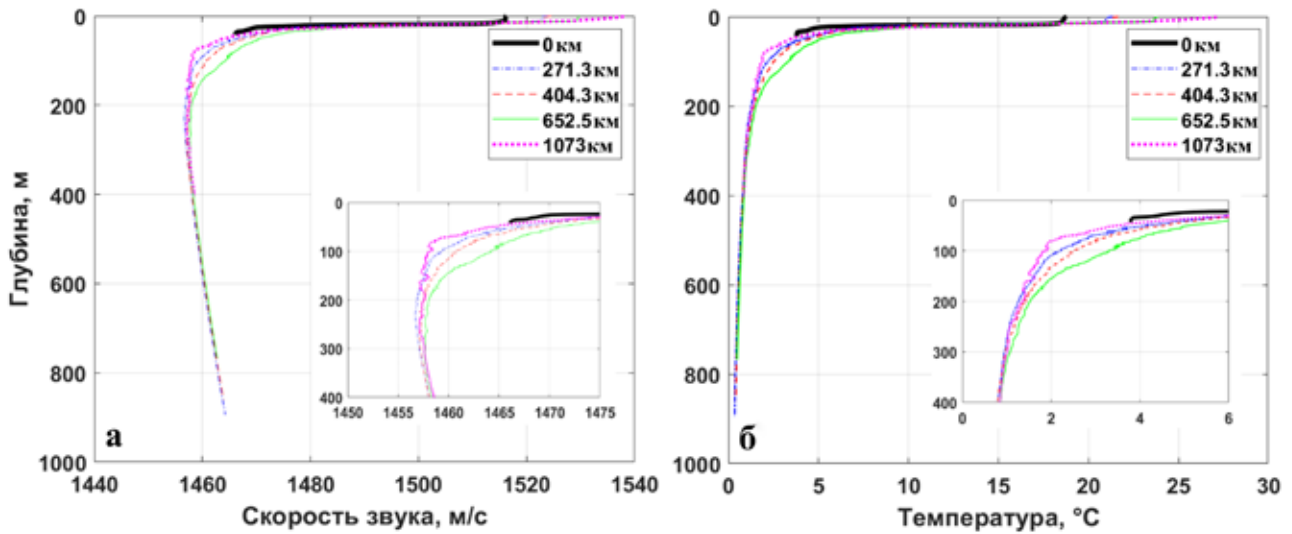


Рис. 6. Измеренные CTD-зондом вертикальное распределение скорости звука (а) и температуры (б) по глубине в заданных точках

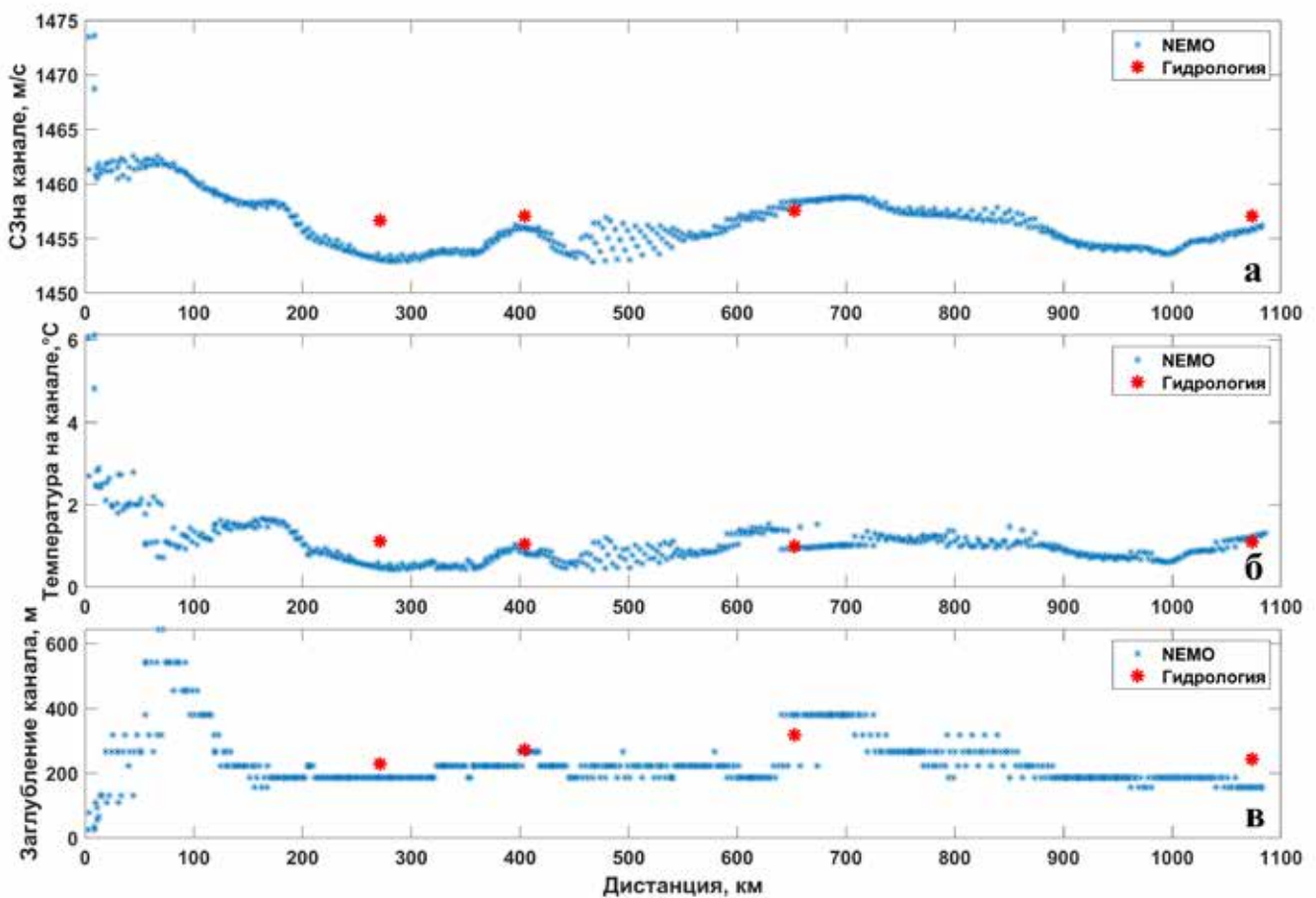


Рис. 7. Данные гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и прямых CTD-измерений: а – изменение скорости звука на оси ПЗК вдоль акустической трассы; б – изменение температуры на оси ПЗК вдоль акустической трассы; в – изменение глубины залегания оси ПЗК вдоль акустической трассы

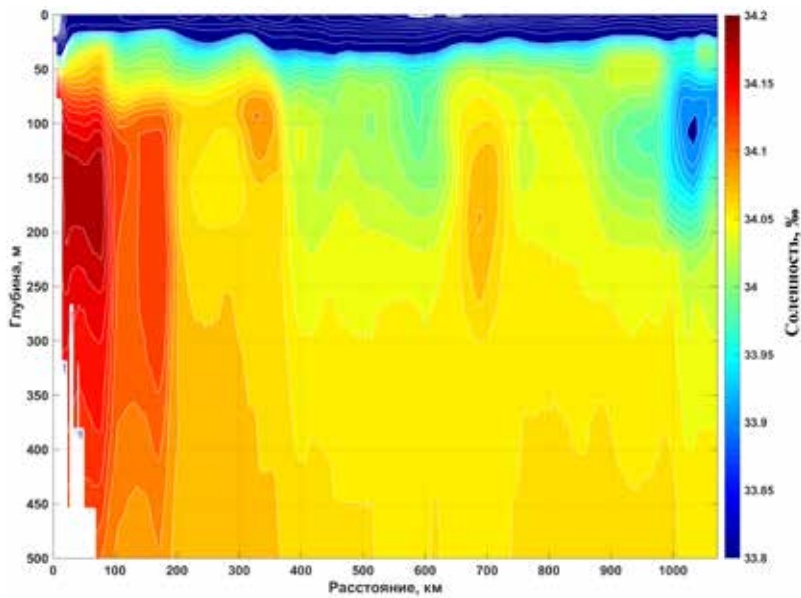


Рис. 8. Разрез солености вдоль акустической трассы по данным модели циркуляции океана NEMO

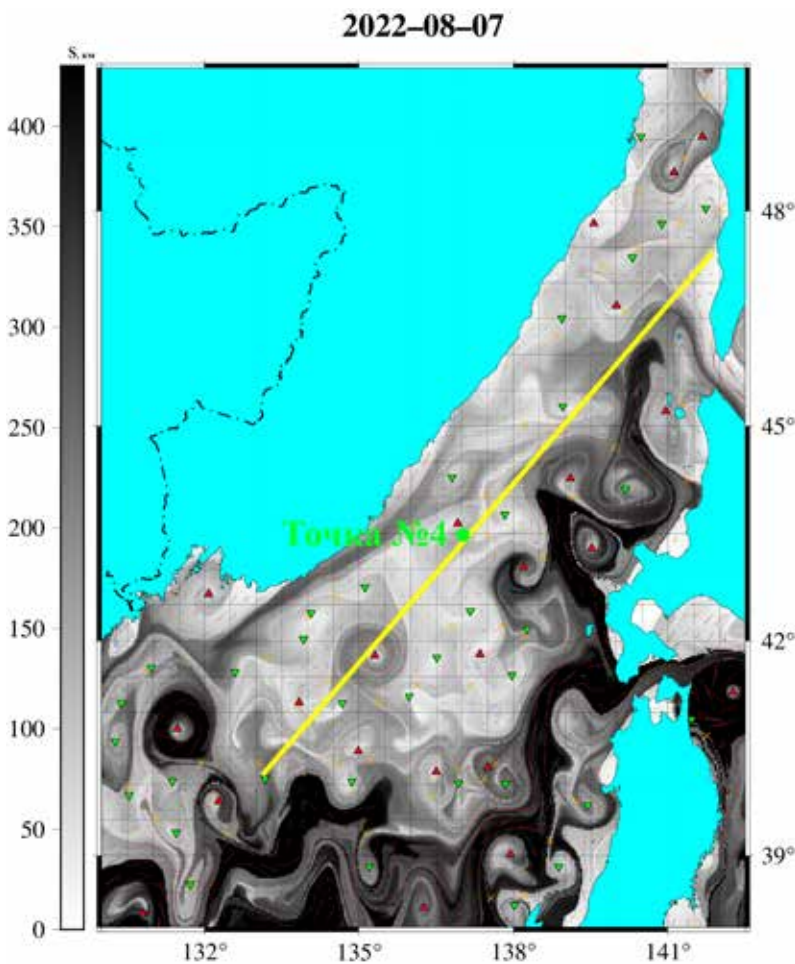


Рис. 9. Лагранжева карта длин траекторий (в км) за 30 суток по данным поля скорости AVISO. Темный цвет соответствует областям активной адвекции водных масс. Красные и зеленые треугольники – центры антициклонов и циклонов соответственно. Оранжевые крестики – гиперболические точки. Желтая линия – акустическая трасса

В таблице приведены сводные данные измерений с помощью CTD и диагнозов гидродинамической модели NEMO

Как видно из таблицы, данные хорошо коррелируют и имеют близкие значения, особенно в точках, находящихся в глубоководной части Японского моря. Стоит отметить, что в точке 4, где регистрируется увеличение скорости звука, температура изменяется незначительно ($0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с точкой 3), что привело бы к изменению скорости звука на $0,086\text{ м/с}$, причем в меньшую сторону. Таким образом, изменение скорости звука происходит за счет увеличения давления на оси ПЗК, т.е. ее заглубления. При анализе данных о солености вдоль акустической трассы отмечена аномалия, находящаяся рядом с точкой CTD-замера (600–730 км на рис. 8).

Можно сделать вывод, что ось ПЗК заглубляется, огибая соленую аномалию, возникшую от вихревой структуры.

Для подтверждения гипотезы о прохождении акустической трассы через вихревую структуру была привлечена лагранжева карта длин траекторий пассивных маркеров для Японского моря по данным поля скорости AVISO [15–16]. Темный цвет (рис. 9) выделяет области моря, где водные массы были либо вовлечены во вращательное движение в вихрях, либо адвектировались струйными потоками. AVISO показала наличие антициклонического вихря, локализованного вблизи возвышенности Богорова. Более того, оставшийся путь трасса также проходит через антициклонический вихрь, имеющий даже большую динамику, это может быть объяснением того, что полученная в результате акустической термометрии величина средней скорости звука по трассе несколько выше средней, полученной по данным CTD.

Таким образом, можно констатировать, что данные гидродинамической модели циркуляции океана NEMO могут значительно расширить результаты измерений CTD-зондами и помочь в интерпретации полученных результатов. В данном случае оперативный мониторинг гидрологической обстановки в зоне проведения

Параметры ПЗК вдоль акустической трассы

№	Дистанция (км)	Мин. скорость звука, м/с		Температура, °С		Глубина, м	
		CTD	NEMO	CTD	NEMO	CTD	NEMO
1	0	1466.025	-	3.94	-	41.4	-
2	271.3	1456.678	1453.104	1.116	0.475	228.5	186.1
3	404.3	1457.067	1456.012	1.041	0.822	272.4	266.1
4	652.5	1457.567	1458.438	0.988	0.948	317.5	380.2
5	1080	1457.076	1456.099	1.096	1.235	242.9	155.9
Среднее, без учета шельфа		1457.097	1455.913	1.060	0.870	265.3	247.1

эксперимента позволил предсказать и подтвердить инструментально наличие на трассе вихревых систем.

Выводы

Результаты пилотного акустико-гидрологического эксперимента подтвердили правильность методических и технических подходов к практической реализации метода акустической термометрии протяженных морских акваторий. Полученное по 112 оценкам значение температуры 1,258 °С на оси ПЗК в Японском море до десятых долей градуса согласуется с данными CTD-промеров вдоль трасс.

Привлечение данных гибридной гидродинамической модели циркуляции океана NEMO и лагранжевой карты длин траекторий пассивных маркеров для Японского моря по данным поля скорости AVISO к интерпретации полученных результатов позволило выявить и классифицировать вихревые системы, че-

рез которые проходила акустическая трасса. Таким образом, превышение значения средней по трассе температуры по данным акустических измерений в сравнении со значениями CTD зондирования может быть объяснено влиянием второго, более динамично-го антициклонического вихря.

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: АААА-А20-120031890011-8). Анализ и интерпретация результатов проводились в рамках госбюджетной темы НИР ТОИ ДВО РАН «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования».

ЛИТЕРАТУРА

1. Kevin D. Heaney and Richard L. Campbell, Perth-Bermuda revisited again: Global adiabatic mode parabolic equation results // J. Acoust. Soc. 2011. Vol 130(4). P. 2569.
2. Munk W., Wunsch C. Observing the ocean in the 1990's // Philos. Trans. R. Soc. London. 1982. Vol. 307, No. 1499. P. 439–464.
3. Munk W., Wunsch C. Up-down resolution in ocean acoustic tomography // Deep-Sea Res. 1982. Vol. 29. P. 1415–1436.
4. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: Rays and modes // Rev. Geophys. Space Phys. 1983. Vol. 21(4). P. 777–793.
5. Dzieciuch M., Colosi J., Cornuelle B., Munk W., Worcester P. The precision of travel time in ATOC experiments // The Journal of the Acoustical Society of America. 1996. Vol. 100(4). P. 2581.
6. Spindel R.C., Cornuelle B.D., Dzieciuch M., Munk W.H., Worcester P.F., Baggeroer A.B., Menemenlis D., Wunsch C., Birdsall T.G., Metzger K., Clark C., Colosi J.A., Costa D., Dushaw B.D., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Forbes A.M.G. Acoustic thermometry of ocean climate: Comparison of acoustic, altimetric, and historical data // The Journal of the Acoustical Society of America. 1998. Vol. 103 (5). P. 2750.
7. Spindel R.C., Howe B., Worcester P.F. Experimental design for acoustic thermometry of ocean climate // The Journal of the Acoustical Society of America. 1994. Vol. 95 (5). P. 2850.
8. Munk W.H. Acoustic thermometry of ocean climate // The Journal of the Acoustical Society of America. 1996. Vol. 100 (4). P. 2580.
9. 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 // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 3. С. 341–347.
10. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // ДАН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821–823.
11. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирования импульсной характеристики в глубоком море // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 1. С. 51–52.

12. 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 // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 641–649.
13. 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 дальнейшем распространения импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море // Акустический журнал. 2020. Т. 66, № 1. С. 20–33.
14. Madec G., Imbard M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity // *Climate Dynamics*. 1996. Vol. 12 (6). P. 381–388.
15. Prants S.V., Lobanov V.B., Budyansky M.V., Uleysky M.Y. Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2016. Vol. 109. P. 61–75.
16. Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean. Berlin, New York: Springer Verlag, 2017. 285 p.
17. Charles F. F. Karney. Algorithms for geodesics // *J Geod*. 2013. Vol. 87. P. 43–55. DOI 10.1007/s00190-012-0578-z
18. Chen C.-T., Millero F.J. Speed of sound in seawater at high pressures // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1977. Vol. 62, Iss. 5. P. 1129–1135.

Об авторах

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

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

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

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

Тел.: +7(4232)311-400

Е-mail: golov_alexander@inbox.ru

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

ЛЕБЕДЕВ Михаил Сергеевич, 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, д. 43

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

Тел.: +7(4232)311-400

Е-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

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

БЕЗОТВЕТНЫХ Владимир 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, д. 43

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

Тел.: +7(4232)311-400

Е-mail: vladim_bez@poi.dvo.ru

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

СТРОБЫКИН Дмитрий Сергеевич, 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, д. 43

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

Тел.: +7(4232)311-400

Е-mail: strobykind@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8342-8085>

СОРОКИН Михаил Андреевич, аспирант лаборатории 3/2 – геофизической гидродинамики

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

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

Область научных интересов: гидроакустика, математическое моделирование распространения звука в океане.

Тел.: +7(4232)311-400

Е-mail: sorokin.ma@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8933-2834>

БУДЯНСКИЙ Максим Васильевич, в.н.с. лаборатории 3/1 – нелинейных динамических систем

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

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

Область научных интересов: исследование нелинейных динамических процессов в океане и атмосфере, самоорганизация, хаос в природе

Тел.: +7(4232)311-400

Е-mail: plaztic@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2291-6792>

Для цитирования:

Голов А.А., Лебедев М.С., Безответных В.В., Стробыкин Д.С., Сорокин М.А., Будянский М.В. ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА СВЕРХДАЛЬНИХ ДИСТАНЦИЯХ В ЯПОНСКОМ МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 2 (44). С. 83–92. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_08. EDN: VTKEBR.

HYDROLOGICAL AND ACOUSTIC RESEARCH AT ULTRA-LONG DISTANCES IN THE SEA OF JAPAN

A.A. Golov, M.S. Lebedev, V.V. Bezotvetnykh, D.S. Strobykin, M.A. Sorokin, M.V. Budyanskii

The article discusses the results obtained when performing a pilot acoustic-hydrological experiment in August 2022 on the route from the coast of Sakhalin Island to the Kita-Yamato Bank in the Sea of Japan. The methodology of integrated studies designed to study the climatic variability of temperature regimes in the water area is presented. The basis of the methodology is a combination of acoustic thermometry methods, in situ CTD data, and data from NEMO ocean circulation models. Based on the results of 112 measurements, an estimate was made of the average temperature along the route at the depth of the underwater sound channel. This value can be used to assess the impact of global warming on temperature regimes in the study area. An assessment was made of the influence of two vortex formations crossing the acoustic path on the propagation of broadband phase-shift keyed signals.

Keywords: hydroacoustics, pseudo-random signals, ocean circulation models, impulse response, localization of eddy formations

References

1. Kevin D. Heaney and Richard L. Campbell, Perth-Bermuda revisited again: Global adiabatic mode parabolic equation results. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 130(4). P. 2569
2. Munk W. and C. Wunsch, 1982. Observing the ocean in the 1990's. *Philos. Trans. R. Soc. London* 307, P. 439–464
3. Munk W. and C. Wunsch, 1982. Up/down resolution in ocean acoustic tomography. *Deep-Sea Res.* 29, 1415–1436.
4. Munk W. and C. Wunsch, 1983. Ocean acoustic tomography: Rays and modes. *Rev. Geophys. Space Phys.* 21(4), 777–793.
5. Matthew Dzieciuch, John Colosi, Bruce Cornuelle, Walter Munk and Peter Worcester. The precision of travel time in ATOC experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America* 100(4), 2581 (1996)
6. Robert C. Spindel, ATOC Group, B.D. Cornuelle, M. Dzieciuch, W.H. Munk, P.F. Worcester, A.B. Baggeroer, D. Menemenlis, C. Wunsch, T.G. Birdsall, K. Metzger, C. Clark, J.A. Colosi, D. Costa, B.D. Dushaw, B.M. Howe, J.A. Mercer, R.C. Spindel and A. M. G. Forbes, Acoustic thermometry of ocean climate: Comparison of acoustic, altimetric, and historical data, *The Journal of the Acoustical Society of America* 103(5), 2750 (1998)
7. Robert C. Spindel, Bruce Howe, Peter F. Worcester, Experimental design for acoustic thermometry of ocean climate, *The Journal of the Acoustical Society of America* 95(5), 2850 (1994)
8. Walter H. Munk, Acoustic thermometry of ocean climate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(4), 2580(1996)
9. Morgunov Y.N., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voitenko E.A. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water. *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. No. 3. P. 350-356.
10. Morgunov Y.N., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voitenko E.A. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water. *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. No. 3. P. 350-356.
11. Morgunov Y.N., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voitenko E.A. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water. *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. No. 3. P. 350-356.
12. Morgunov Y.N., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voitenko E.A. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water. *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. No. 3. P. 350-356.
13. Morgunov Y.N., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voitenko E.A. Study of how hydrological conditions affect the propagation of pseudorandom signals from the shelf in deep water. *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. No. 3. P. 350-356.
14. Gurvan Madec, Maurice Imbard (May 1996). "A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity". *Climate Dynamics*. 12 (6): 381–388.
15. Prants S.V., Lobanov V.B., Budyansky M.V., Uleysky M.Y. (2016) Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 109:61–75
16. Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. (2017) Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean. *Physics of Earth and Space Environments*. Springer.
17. Charles F. F. Karney. Algorithms for geodesics. *J Geod.* 2013. Vol. 87. P.43-55. DOI 10.1007/s00190-012-0578-z
18. C.-T. Chen, F.J. Millero. Speed of sound in seawater at high pressures. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1977. Vol. 62, Iss. 5. P. 1129-1135.

About the authors

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

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

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

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

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

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

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

BEZOTVETNYKH Vladimir Viktorovich, Senior researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic Tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

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

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: vladim_bez@poi.dvo.ru

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

STROBYKIN Dmitrii Sergeevich, Senior researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

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

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: strobykind@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8342-8085>

SOROKIN Mikhail Andreevich, Postgraduate student of the laboratory 3/2 – geophysical hydrodynamics

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Scientific interests: hydroacoustics, mathematical modeling of sound propagation in the ocean.

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: sorokin.ma@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8933-2834>

BUDYANSKY Maksim Vasil'evich, Leading researcher of the laboratory 3/1 - of Nonlinear Dynamic Systems

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Scientific interests: study of nonlinear dynamic processes in the ocean and atmosphere, self-organization, chaos in nature

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: plaztic@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2291-6792>



Recommended citation:

Golov A.A., Lebedev M.S., Bezotvetnykh V.V., Strobykin D.S., Sorokin M.A., Budyanskii M.V. HYDROLOGICAL AND ACOUSTIC RESEARCH AT ULTRA-LONG DISTANCES IN THE SEA OF JAPAN. Underwater investigations and robotics. 2023. No. 2 (44). P. 83–92. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_08. EDN: VTKEBR.

