

УДК 534.222

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕРМОМЕТРИИ НА ПРОТЯЖЕННОЙ ТРАССЕ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

© 2023 г. Академик РАН Г. И. Долгих<sup>1</sup>, Ю. Н. Моргунов<sup>1</sup>, В. В. Безответных<sup>1</sup>, А. В. Буренин<sup>1</sup>, А. А. Голов<sup>1,\*</sup>, Е. А. Войтенко<sup>1</sup>, В. В. Разживин<sup>1</sup>, А. А. Тагильцев<sup>1</sup>

Поступило 31.10.2022 г.

После доработки 30.11.2022 г.

Принято к публикации 02.12.2022 г.

Представлены методические и технические возможности проведения мониторинга температурных полей на тысячекилометровой трассе в Японском море методом акустической термометрии. Предложенный томографический метод мониторинга динамики и структуры вод основан на излучении и приеме сложных фазоманипулированных сигналов на диагностируемой трассе с определением времени распространения по различным лучевым траекториям с последующим определением скорости звука и температуры. Физические предпосылки для практической реализации термометрических исследований на больших расстояниях базируются на эффекте акустического “оползня” – явления перехода акустической энергии из придонной области шельфа в подводный звуковой канал глубокого океана. На примере Японского моря предложена и экспериментально апробирована высокоточная система акустической термометрии на базе томографических схем с мобильными и стационарными гидроакустическими излучателями и приемными системами.

*Ключевые слова:* гидроакустическая томография, термометрия, контроль изменения климата, сложные фазоманипулированные сигналы

**DOI:** 10.31857/S2686739722602459, **EDN:** TJJXGR

Решение актуальных задач исследования и контроля изменения климата на планете во многом зависит от результатов многолетнего изучения изменчивости температурных режимов океанов и морей с использованием приборов на различных физических принципах. Акустическая термометрия, применяющаяся для измерения структуры и динамики глубоководных и мелководных акваторий, была в течение последних десятиков лет продемонстрирована в целом ряде экспериментов [1–4]. В статье обсуждаются методические и технические возможности осуществления мониторинга температурных полей в Японском море методом акустической термометрии на протяженных акваториях (свыше 1000 км). Метод основан на излучении и приеме сложных фазоманипулированных сигналов на диагностируемой трассе с определением времени распространения в подводном звуковом канале (ПЗК) с последующим определением скорости звука и, по известным в океанологии алгоритмам, температуры [5]. Физические предпосылки для практической реализа-

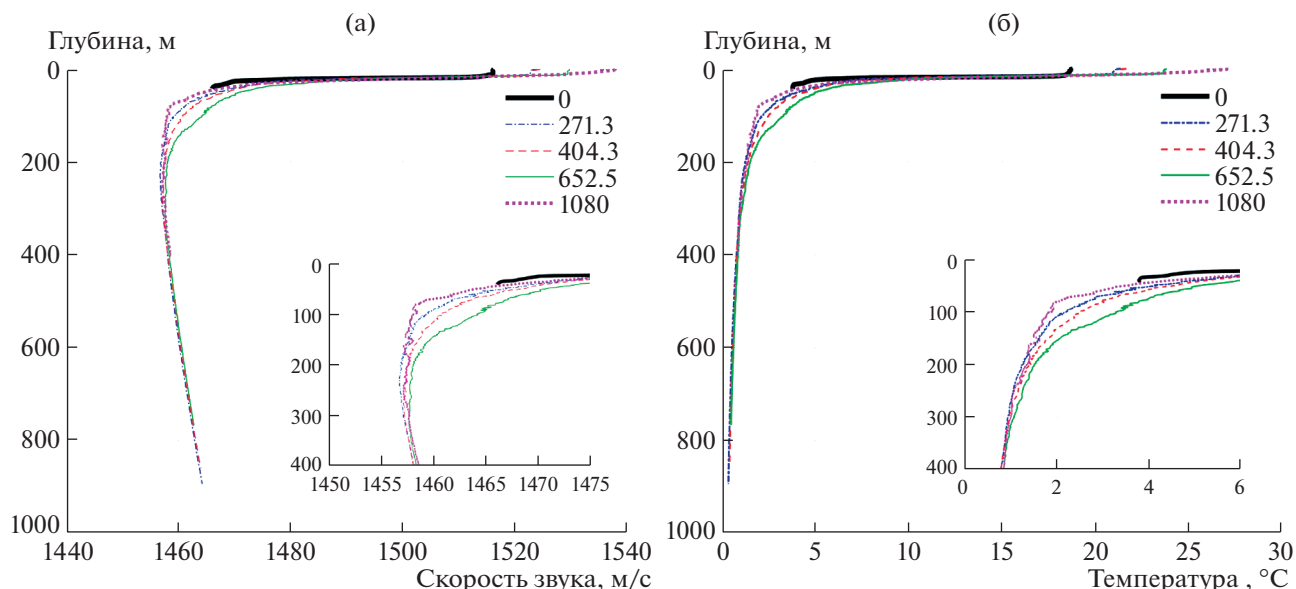
ции термометрических исследований на больших расстояниях базируются на эффекте акустического “оползня” – явлении перехода акустической энергии из придонной области шельфа в подводный звуковой канал глубокого океана и дальнейшего распространения с малым затуханием [6].

В статье обсуждаются результаты демонстрационного эксперимента, иллюстрирующего возможности технической реализации метода акустической термометрии в Японском море на акустической трассе протяженностью 1080 км.

Излучатель был стационарно расположен вблизи берега у поселка Чехов (о. Сахалин), на глубине 41 м и на удалении 5 км от свала глубин. Каждые 6 мин излучался фрейм, состоящий из нескольких фазоманипулированных псевдослучайными M-последовательностями сигналов: длиной 1023 символа с заполнением 4 периодами несущей частоты на символ (далее M1023) и 127 символов с 40 периодами на символ (далее M127). Все сигналы имели несущую частоту 400 Гц, но различные полосы частот: M1023 – полосу 300–500 Гц (длина символа 0.01с); M127 – полосу 390–410 Гц (длина символа 0.1с). Развиваемое акустическое давление составляло около 8000 Па на 1 м от излучателя. Приемная система

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

\*E-mail: golov\_alexander@inbox.ru



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

на базе радиогидроакустического буя дрейфовала вблизи обеспечивающего судна на удалении 1080 км от излучателя при глубине места около 3 км (рис. 2). Координаты дрейфа ежеминутно фиксировались и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и приемной системой. За время эксперимента, более 8 ч, зарегистрирован дрейф систему на 350 м в сторону юго-востока. 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 а, б). Анализ этих зависимостей показывает, что ось ПЗК (минимум скорости звука и температуры) во всех точках находилась на глубине около 200 м, а в слоях выше оси скорость звука и температура повышались с приближением к приемной системе. Следовательно, с приближением к точке приема фиксируется постепенное увеличение отрицательного градиента скорости звука с глубиной в верхних слоях волновода. Эти факторы могут определять степень затягивания импульсной характеристики во времени и, следовательно, нести информацию о температуре в соответствующих слоях волновода.

Гидрофон приемной системы погружался на глубину оси ПЗК, а принятая сигнальная информация от излучателя поступала на поверхностный радиогидроакустический буй и по радиоканалу передавалась на приемное судно. На рис. 2 приведены импульсные характеристики волновода (в правом углу для сигнала М1023, в левом — для сигнала М127), которые были получены в результате свертки принятых сигналов с излученными.

Следует отметить, что размещение излучателя на шельфе в данном случае обеспечивает реализацию эффекта акустического “оползня” — явления перехода акустической энергии из придонной области шельфа на ось подводного звукового канала в глубоком море. Поэтому на всех импульсных характеристиках в одно и то же время (740.2 с) фиксируется последний максимальный приход акустической энергии, распространяющейся по лучевым траекториям вблизи оси ПЗК с минимальной скоростью ( $1080000 \text{ м}/740.2 \text{ с} \approx 1459 \text{ м/с}$ ). Очень важно, что эта величина и рассчитанная с ее использованием температура ( $2^\circ\text{C}$ ) равны скорости звука и температуре на оси ПЗК, измеренной CTD-зондом. Это свидетельствует о точности метода и качестве применяемых измерительных приборов. Погрешность полученного результата определяется погрешностью измерения времени и дистанции. Применяемая аппаратура обеспечивает измерение времени прихода зондирующих сигналов с погрешностью  $\Delta t = \pm 0.001 \text{ с}$ . GPS-приемник обеспечивает определения местоположения с погрешностью  $\Delta d = \pm 5 \text{ м}$ . Для акустической трассы протяженностью  $D = 1080 \text{ км}$  и времени распространения  $\tau = 740.2 \text{ с}$ , погрешность определения средней скорости звука  $\Delta C = (D \pm \Delta d)/(\tau \pm \Delta \tau) - D/\tau$  составляет  $\pm 0.005 \text{ м/с}$ . Используя алгоритм вычисления температуры, солёности и давления от скорости звука, находим, что погрешность измерения температуры в эксперименте  $\Delta t = \pm 0.001^\circ\text{C}$ .

Импульсная характеристика при приеме сигналов М127 существенно отличается от полученной при свертке сигналов М1023 и позволяет

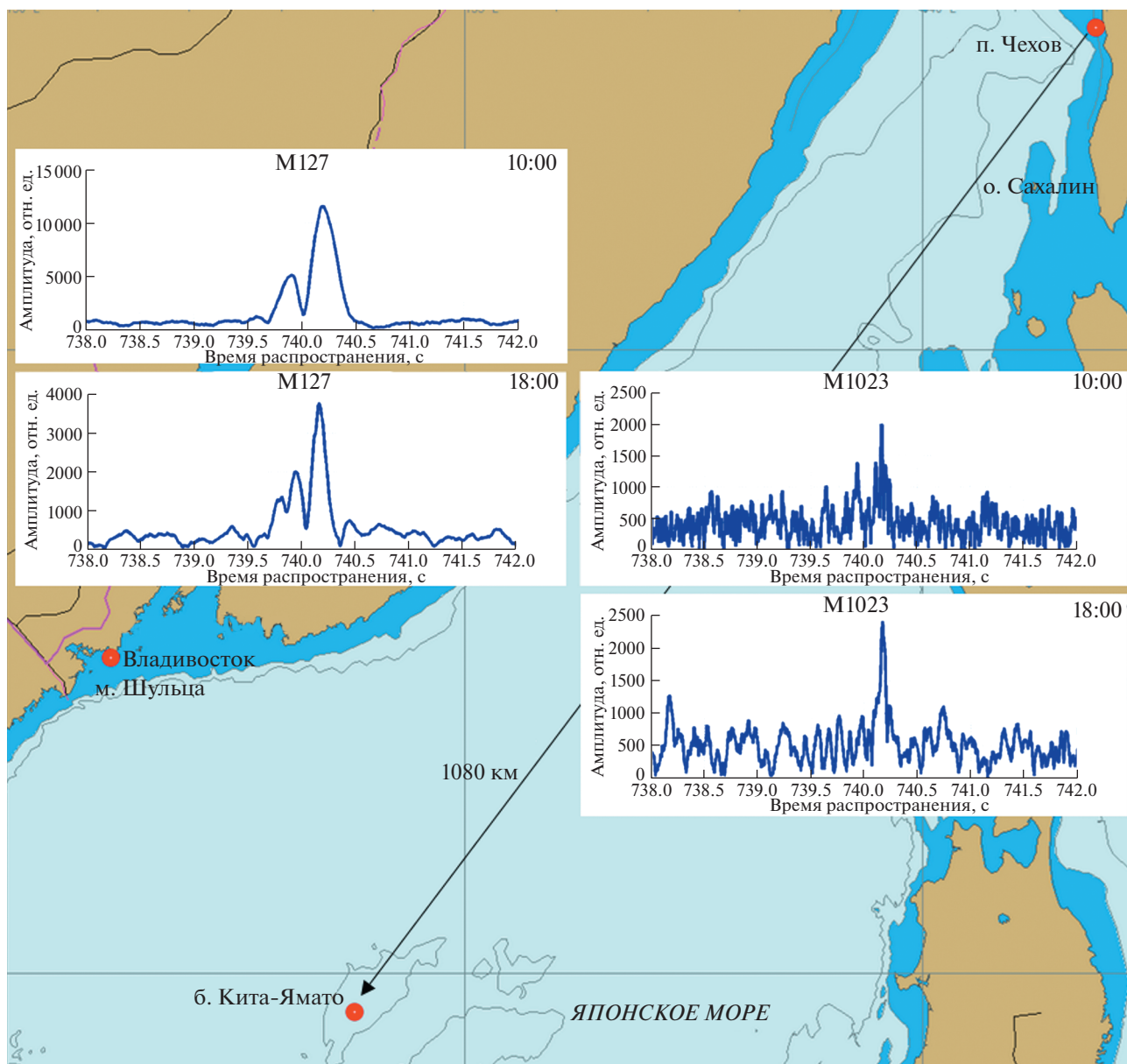


Рис. 2. Схема эксперимента на карте и импульсные характеристики волновода.

фиксировать ранние приходы акустической энергии за счет большей длительности символов, позволяющей интегрировать лучевые приходы с большими углами в точку приема [7]. Можно утверждать, что смещение импульсной характеристики относительно максимального прихода в сторону меньших значений времени подтверждает отмеченный выше факт потепления верхних слоев, отмеченный при измерениях CTD (рис. 1). Следовательно, предложенный метод может быть использован и для оценки температурных режимов и их изменчивости в различных слоях (от поверхности до заглубления оси ПЗК) диагностиру-

емого волновода на различных временных интервалах от суточных до межгодовых.

Результаты демонстрационного эксперимента подтвердили эффективность методических и технических подходов к практической реализации метода акустической термометрии протяженных морских акваторий для изучения изменчивости температурных режимов в океане. Получена и подтверждена инструментальными измерениями величина средней температуры ( $2^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ ) в деятельном слое морской среды Японского моря на тысячекилометровой акустической трассе. Показаны преимущества применения

фазоманипулированных сигналов с большими длительностями символов для обеспечения приема и анализа акустической энергии по лучевым траекториям с более крутыми углами для получения информации о температуре во всем деятельном слое волновода.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования финансированы и 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 данных финансированы и выполнены в рамках темы “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”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М., Гаврилов А.Н., Гончаров В.В., Писарев С.В., Михалевский П.Н., Чепурин Ю.А. Результаты эксперимента ACOUS (Arctic Climate Observation using Underwater Sound) // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 6. С. 726–737.
2. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1979. V. 26. Iss. 2. P. 123. С. 161.
3. 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.
4. 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.
5. Chen C.-T., Millero F.J. Speed of sound in seawater at high pressures // The Journal of the Acoustical Society of America. 1977. V. 62 (5). P. 1129. С. 1135.
6. Wolfson M.A., Spiessberger J.L., Tappert F.D. Internal wave effects on long-range ocean acoustic tomography // The Journal of the Acoustical Society of America. 1995. V. 97. P. 3235.
7. Безответных В.В., Буренин А.В., Голов А.А., Моргунов Ю.М., Лебедев М.С., Петров П.С. Экспериментальные исследования импульсной характеристики волновода Японского моря с использованием псевдослучайных последовательностей в навигации подводных объектов // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 3. С. 291. С. 297.

## EXPERIMENTAL TESTING OF THE METHOD OF ACOUSTIC THERMOMETRY ON A LONG TRACK IN THE SEA OF JAPAN

Academician of the RAS G. I. Dolgikh<sup>a</sup>, Yu. N. Morgunov<sup>a</sup>, V. V. Bezotvetnykh<sup>a</sup>, A. V. Burenin<sup>a</sup>, A. A. Golov<sup>a, #</sup>, E. A. Voitenko<sup>a</sup>, V. V. Razzhivin<sup>a</sup>, and A. A. Tagiltsev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: golov\_alexander@inbox.ru*

The methodological and technical possibilities of monitoring temperature fields on a thousand-kilometer track in the Sea of Japan using acoustic thermometry methods are presented. The proposed tomographic method for monitoring the dynamics and structure of water is based on the emission and reception of complex phase-shift keyed signals on a diagnosed path with the determination of the propagation time along various ray trajectories, followed by the calculation of the speed of sound and temperature. The physical prerequisites for the practical implementation of thermometric studies at large distances are based on the effect of an acoustic “mudslide” – the phenomenon of the transition of acoustic energy from the near-bottom shelf area to the underwater sound channel of the deep ocean. In the example of the Sea of Japan, a high-precision acoustic thermometry system based on tomographic schemes with mobile and stationary hydroacoustic emitters and receiving systems was proposed and experimentally tested.

**Keywords:** hydroacoustic tomography, thermometry, climate change control, complex phase-shift keyed signals