

АКУСТИКА ОКЕАНА.
ГИДРОАКУСТИКА

УДК: 534.222, 534.134, 534.143, 534.442.1, 534.6.08, 621.3.019.1

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ В ЗАДАЧАХ
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ЯПОНСКОГО МОРЯ**

© 2025 г. Б. Н. Боголюбов^а, А. К. Бритенков^а, Д. А. Касьянов^а, В. А. Фарфель^а,
Ю. Н. Моргунов^б, В. В. Безответных^б, Е. А. Войтенко^б, А. А. Голов^{б,*}, А. А. Тагильцев^б

^аФедеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук” (ИПФ РАН),
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

^бФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН),
улица Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: golov_alexander@inbox.ru

Поступила в редакцию 06.08.2024 г.

После доработки 04.11.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Рассмотрено применение технических средств и методов низкочастотной гидроакустики для мониторинга изменчивости средних температур подводных звуковых каналов Японского моря. Проведен обзор характеристик линейки разработанных ИПФ РАН мощных гидроакустических излучателей, перспективных для организации протяженных акустических трасс. Приведены результаты измерений электроакустических характеристик низкочастотных гидроакустических излучателей в натуральных условиях в эшелоне глубин до 150 м, а также рассмотрено применение указанных излучателей для исследования температурных режимов сопряженных подводных звуковых каналов шельфа и глубокого моря на разномасштабных протяженных трассах в Японском море. На основе обработки экспериментальных данных акустической трассы длиной около 1000 км, полученных в 2022 г., приведены примеры восстановления средних значений температуры воды по данным скорости звука на акустической трассе, проведена оценка чувствительности метода, а также проанализированы достигнутые в эксперименте значения отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: акустическая термометрия, низкочастотный гидроакустический излучатель, акустическая мощность, подводный звуковой канал, функция корреляции, M-последовательность, последовательности Баркера

DOI: 10.31857/S0320791925010085, EDN: BQRVKV

ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотные излучатели применяются для многих прикладных задач гидроакустики, решаемых в больших пространственных масштабах: освещения подводной обстановки, дальней звукоподводной связи и навигации, сейсмоакустической разведки на акваториях, исследования условий распространения звука в океане. Одной из таких задач, актуальных для современного мира, становится применение средств и методов низкочастотной гидроакустики, а именно методов акустической томографии, для термометрии среды при изучении океанского климата [1, 2]. В практическом плане, реализация акустической термометрии

океана связана с обеспечением мониторинга температуры среды на протяженных акустических трассах. Это предполагает учет свойств подводных звуковых каналов (ПЗК) как “проводников” акустической энергии, устойчивых, но подверженных сезонным изменениям слоев стратифицированной среды, для измерения в них средней скорости звука с последующим восстановлением значений связанной со скоростью звука температуры. Для технической реализации, как показали проведенные ранее эксперименты [3, 4], необходимо использование мощных широкополосных гидроакустических источников сигналов, разработанных на основе современных технологий, а также средств

приема и согласованной обработки сигналов. Кроме того, одной из ключевых задач является определение акваторий, как минимум, регионального масштаба, для организации на них систематических наблюдений.

В исследованиях сезонной изменчивости температурных полей акустическими методами [5–7] расчетами и экспериментальными работами показано, что, анализируя временную структуру импульсной характеристики волновода, можно оценивать вертикальное распределение температур на диагностируемой акватории, что позволяет осуществлять мониторинг изменчивости средних температур в характерных слоях волновода. Более точные значения скорости звука при этом получаются при прохождении импульсов по траектории с меньшим количеством отражений, ввиду минимизации ошибки, связанной с влиянием рельефа дна между корреспондирующими точками. Это говорит о широких возможностях акустической термометрии и целесообразности мониторинга среды вблизи оси ПЗК.

Представленный в данной статье материал относится к теме, которой уделял большое внимание Виталий Анатольевич Зверев — совершенствованию акустических методов исследования океана, а именно изучению особенностей распространения звука и потенциальных возможностей дистанционного зондирования океана на длинных и сверхдлинных трассах. Разработанные им новые подходы, с теоретическим и экспериментальным обоснованием условий их применения при анализе получаемых в морских экспедициях данных [7], стали базой современных методик анализа импульсного отклика канала распространения звука, улучшения временной и структурной селекции полезных сигналов, повышения разрешающей способности акустической дальнометрии.

1. АКУСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ И МОНИТОРИНГ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Развиваемые методы и технологии низкочастотной гидроакустики позволяют реализовать мониторинг температуры среды в региональных масштабах. ТОИ ДВО РАН ведет исследования в этом направлении более 15 лет. Использование новых типов мощных акустических излучателей расширяет возможности и масштабы экспериментальных работ. Среди первоочередных задач — организация протяженных акустических трасс в ключевых (в отношении гидрологических процессов) районах Японского моря, где исследования продолжаются на основе междисциплинарного подхода с привлечением методов акустической томографии, новых инженерных решений в части обеспечения широкополосного и высокоэнергетического излучения звука, моделирования условий распространения сигналов, учета многолетних и оперативных

океанологических данных, а также данных спутниковой океанологии.

Особенностями реализации акустической термометрии морской среды и важным преимуществом, с точки зрения технологии создания акустических трасс, являются применение новых типов мощных низкочастотных излучателей (НЧИ), а также методика их постановки вблизи побережья с учетом гидрологических и батиметрических характеристик дальневосточных морей.

Как известно [3, 4], в условиях летне-осенней гидрологии для шельфовой зоны Японского моря, лучевые траектории акустической энергии низкочастотного источника концентрируются в узком придонном звуковом канале. При выходе в глубокое море эти лучи попадают на ось ПЗК и далее распространяются практически вдоль нее, независимо от изменений ее заглупления. Условия сопряженности придонного на шельфе и глубинного ПЗК, как показывают проведенные экспериментальные исследования, присутствуют практически на всей западной части Японского моря. При изменении условий сопряженности вследствие аномальных метео- и гидрологических процессов, приводящих к ухудшению приема сигналов, может использоваться резерв передающего тракта (запас по мощности излучающей системы и изменение структуры широкополосных сигналов) или оперативная постановка источника сигналов в смежном районе побережья.

2. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

В силу специфики низкочастотной гидроакустики, в литературе недостаточно освещается комплекс проблем, возникающих при разработке и конструировании низкочастотных гидроакустических излучателей. Известны единичные обзоры, например, [8], где приведена классификация основных видов низкочастотных излучателей, рассмотрены принципы их действия, технические характеристики и конструктивные особенности.

Как правило, акустический излучатель состоит из активной и пассивной подсистем. Активная система представляет собой преобразователь энергии какого-либо вида в энергию механического колебательного движения, пассивная система — это обычно элементы крепления и (или) механические трансформаторы, преобразующие один вид колебательной энергии в другой. Эффективность акустического излучателя определяется КПД преобразования как в активной, так и в пассивной подсистемах. Известно, что КПД преобразования электрической энергии в механическую для обратного пьезоэлектрического эффекта достигает 95–98 %, поэтому подавляющее большинство гидроакустических преобразователей в настоящее

время изготавливаются на основе пьезокерамических активных элементов.

Важной особенностью пьезокерамики является большая величина запасаемой механической потенциальной энергии по отношению к электрической энергии поляризации материала, что определяет высокий КПД преобразователя (при работе на частотах механического и электромеханического резонансов). Однако с другой стороны, пьезокерамика имеет высокие значения упругих модулей, что приводит к тому, что размеры активных пьезоэлементов, работающих на продольных резонансах на низких частотах, зачастую оказываются неприемлемо большими.

Для уменьшения характерных размеров акустических преобразователей, работающих на низких частотах, например, подводных гидроакустических излучателей, существует несколько путей.

Первый путь связан с введением в колебательную систему механических конструкций, позволяющих трансформировать продольные механические деформации в поперечные деформации или изгибные. При этом КПД системы определяется не только электромеханическим КПД, но и КПД механоакустического преобразования энергии.

Второй путь связан с организацией простых колебательных систем, имеющих несколько разновидностей.

Это, во-первых, использование для излучения звука объемных резонаторов. Например, резонаторов типа Гельмгольца или открытых цилиндрических резонаторов, излучение которых связано с возникновением объемного резонанса столба жидкости. В этом случае излучатель представляет собой точечный монополь с крайне низкой эффективностью, хотя в конструкциях данного вида отсутствуют ограничения по глубинам. Или использование волновых резонаторов, где излучающая апертура может представлять собой уже не точечный монополь. Существующие технические решения для глубоководных излучателей подобного типа имеют узкую полосу (единицы Гц), но показывают достаточно высокую эффективность, хотя сложны в плане перестройки частоты [9].

Во-вторых, создание излучателей в виде колебательных систем “поршневого” типа, содержащих упругость, нагруженную на поршень. В реальности упругость определяется продольной упругостью активного пьезоэлемента и упругостью оболочки излучателя, а масса определяется массой оболочки излучателя и присоединенной массой жидкости. В этом случае акустический излучатель представляет собой классический монополь с размерами, сравнимыми с длиной волны.

Если говорить о создании механических трансформаторов в целях излучения звука, то в данном направлении предложено много технических решений. Например, известен способ получения

изгибных колебаний при использовании биморфной конструкции соединения пьезоэлементов. В данной конструкции пьезопластины склеиваются между собой или склеиваются через металлические слои и запитываются в противофазе, что приводит к изгибу всей конструкции. Технические решения по созданию подводных низкочастотных излучателей на базе биморфных конструкций активных элементов имеют существенные ограничения, связанные с механической прочностью пьезокерамических материалов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Кроме этого, большинство подобных конструкций принципиально требуют компенсации внешнего гидростатического давления даже для малых глубин (10–50 м).

Кроме биморфных конструкций широко распространены продольно-изгибные низкочастотные пьезоэлектрические излучатели. В данном случае преобразование продольных деформаций активного элемента в изгибные деформации производится в связанной с активным элементом механической колебательной системе, обычно представляющей собой оболочку эллипсоидного (кимвального) типа, часть внешней поверхности которой является излучающей апертурой. Если радиус кривизны боковой поверхности оболочки велик, то объем, вытесняемый боковой поверхностью оболочки при колебаниях, во много раз больше, чем объем, вытесняемый торцами активного элемента, совершающего продольные колебания. Это позволяет существенно увеличить полезную механическую нагрузку на активный пьезоэлемент и понизить резонансную частоту всей излучающей системы. Технические решения, реализующие концепцию излучателя продольно-изгибного типа и применяемые для целей морской низкочастотной акустики, находят широкое применение для различных целей морской гидроакустики [10–11]. Тем не менее, у подобного типа излучателей есть существенные недостатки. Во-первых, это сложность изготовления и сложность герметизации оболочек, а во-вторых, принципиальная необходимость компенсации внешнего гидростатического давления для эффективного излучения из-за необходимости сохранения геометрии оболочки и нагрузки на активный элемент, создаваемой натяжением оболочки.

По всей видимости, одной из наиболее удачных концепций для создания линейки НЧИ, покрывающей весь необходимый для подводной термометрии диапазон частот, является техническое решение на базе излучателей поршневого типа с развитой излучающей начальной апертурой. У данного типа НЧИ имеются следующие преимущества:

– использование НЧИ без компенсации внешнего гидростатического давления, поскольку предельная рабочая глубина излучателя определяется пределами текучести используемых материалов и возникающими в конструкции при воздействии

гидростатического давления механическими напряжениями;

– возможность существенного увеличения эффективной площади излучающей поверхности относительно площади сечения активного элемента, используя развитую поверхность корпуса излучателя;

– совмещение корпусом излучателя функций излучающей апертуры и несущей конструкции для элементов упругости, выполняющих предварительное напряжение активного пьезокерамического элемента;

– удобство интегрирования корпуса НЧИ в различные защитные и грузонесущие оболочки, которые могут являться конструктивными элементами изделий верхнего уровня. При этом разработка НЧИ одновременно с его акустическим оформлением, т.е. с окружающими конструкциями, необходима принципиально, так как электроакустические

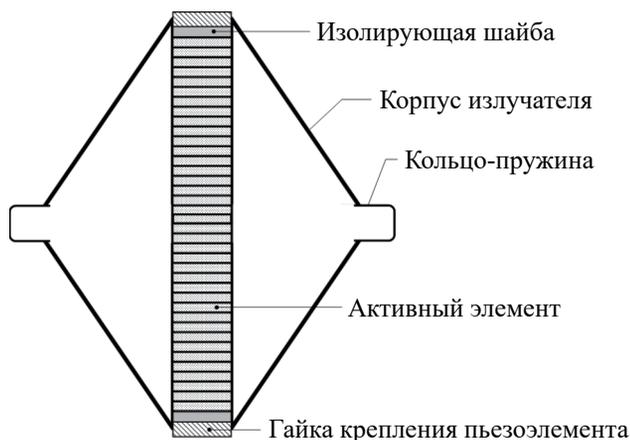


Рис. 1. Конструкция НЧИ с биконической излучающей поверхностью.

параметры НЧИ существенным образом зависят от его акустического окружения.

НЧИ подобного типа разрабатываются в ИПФ РАН более 30 лет. Исследования и многочисленные испытания показали, что наиболее удачным форм-фактором для подобных НЧИ является “биконус”. Схематически конструкция НЧИ биконусного типа изображена на рис. 1.

Излучатель содержит две конические излучающие поверхности, соединенные между собой упругой развязкой в виде кольца-пружины, образующие вместе герметичную оболочку. Активный элемент — столб из включенных параллельно пьезокерамических элементов, изготовленных из пьезокерамического материала (обычно ЦТБС-3), расположен между вершинами излучающих поверхностей и электрически изолирован от корпуса изоляторами. При подаче переменного электрического напряжения активный элемент совершает продольные колебания, передающиеся через торцевые элементы излучающим поверхностям. Электрический импеданс такого преобразователя определяется взаимодействием механической и электрической подсистем, а также влиянием присоединенной массы воды. Конструкция подобного НЧИ допускает его использование без компенсации гидростатического давления до глубин 200–300 м и более.

Разработанные в ИПФ РАН НЧИ данного типа (Бикон) имеют КПД до 80%, развивают акустическое давление до 20 кПа×м для тональных, ЛЧМ и сложных фазоманипулированных сигналов. Отдельные НЧИ имеют подтвержденный испытаниями ресурс не менее 10^{11} циклов колебаний. Линейка НЧИ на основе излучателей такого типа (рис. 2.) практически полностью перекрывает диапазон частот от 150 до 5000 Гц.

Разработанные НЧИ обеспечивают в широкой полосе уровень приведенного акустического давления не менее 10 кПа, при электрических

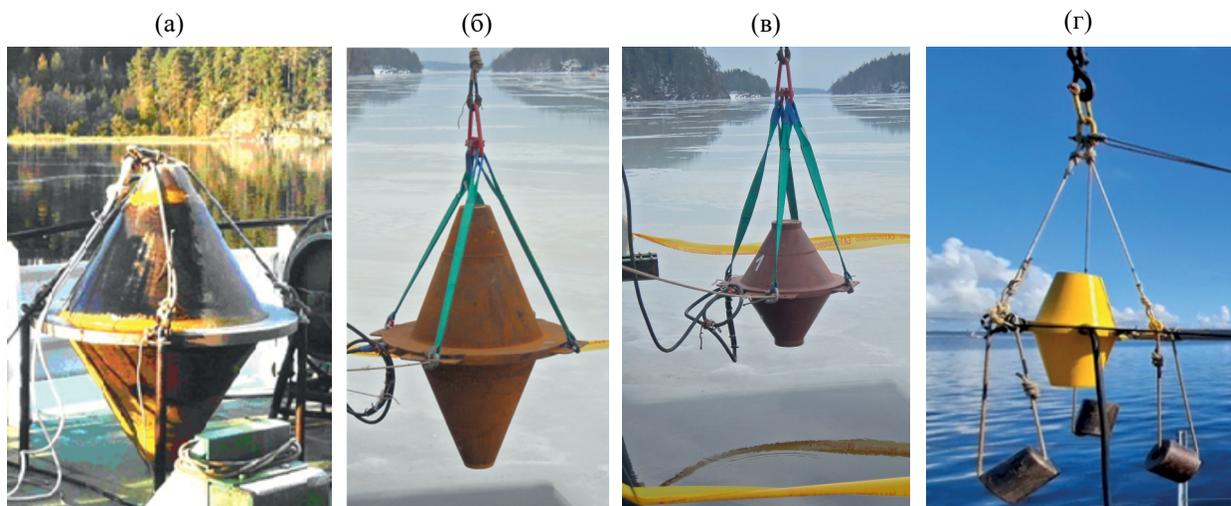


Рис. 2. Линейка НЧИ типа Бикон: (а) — Бикон-1, (б) — Бикон-2, (в) — Бикон-3, (г) — Бикон-4.

Таблица 1. Характеристики НЧИ.

Характеристика	Бикон-1	Бикон-2	Бикон-3	Бикон-4
Диаметр, мм	1400	1000	700	440
Высота, мм	1450	1450	750	400
Масса, кг	500	350	150	40
Максимальное эффективное значение напряжения на НЧИ, В	1500	1500	1500	1500
КПД на резонансной частоте, не менее, %	70	70	70	70
Расчетный ресурс, циклов	10^{11}	10^{11}	10^{11}	10^{11}
Характерное развиваемое звуковое давление на резонансной частоте, приведенное к 1 м, Па	20000	25000	20000	20000
Глубина погружения без компенсатора, м	200	300	350	500

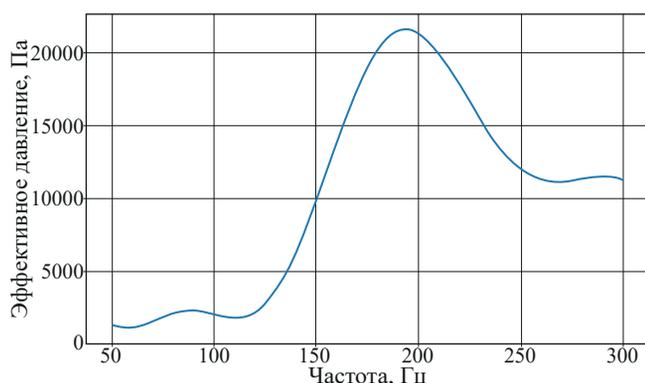


Рис. 3. Характерная зависимость звукового давления, развиваемого НЧИ типа Бикон-1.

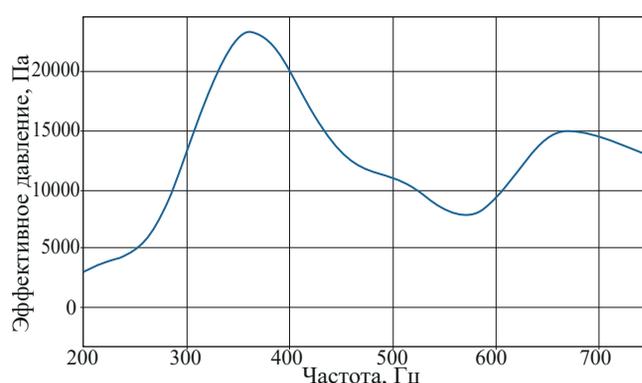


Рис. 4. Характерная зависимость звукового давления, развиваемого НЧИ типа Бикон-2.

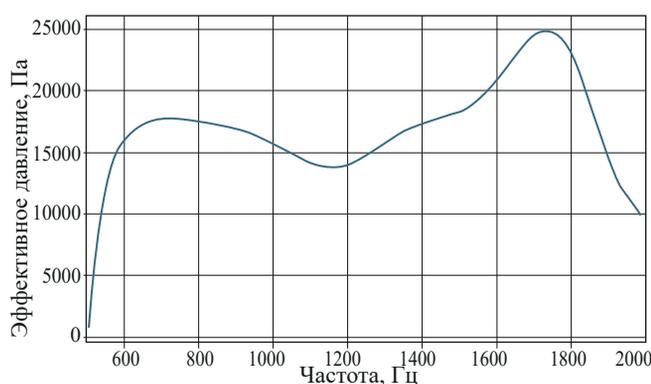


Рис. 5. Характерная зависимость звукового давления, развиваемого НЧИ типа Бикон-3.

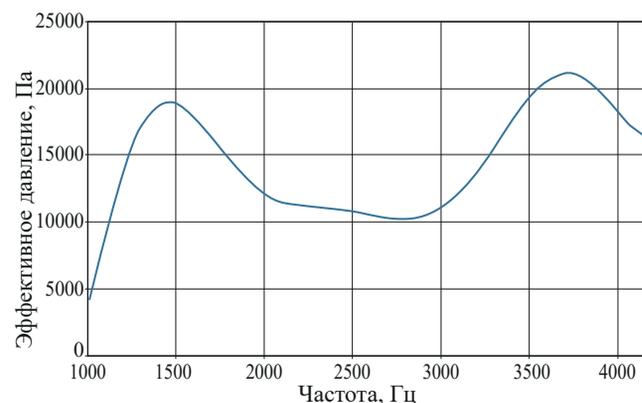


Рис. 6. Характерная зависимость звукового давления, развиваемого НЧИ типа Бикон-4.

напряжениях на НЧИ не более 1.5 кВ. Характерные параметры НЧИ типа Бикон для разных частотных диапазонов сведены в табл. 1.

На рис. 3 и 4 приведены характерные зависимости развиваемого звукового давления, приведенного к 1 м, излучателями Бикон-1 и Бикон-2 соответственно. Особенностью излучателя такого типа для данного диапазона является достаточно широкая рабочая полоса частот, обусловленная тем, что

частотная полоса формируется несколькими связанными между собой резонансами.

На рис. 5 и 6 приведены характерные зависимости развиваемого звукового давления, приведенного к 1 м, излучателями Бикон-3 и Бикон-4. Характерной особенностью Бикон-3, как и Бикон-4, является наличие рабочей полосы в несколько октав. Такая особенность позволяет использовать НЧИ этого типа для излучения широкополосных и сверхширокополосных гидроакустических сигналов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НЧИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Испытания двух образцов НЧИ типа Бикон-2 (рис. 7) проводились в акватории Японского моря в 2020–2023 гг. В рамках испытаний проведена постановка НЧИ с борта обеспечивающего судна в эшелоне глубин до 50 м в условиях якорной стоянки, измерение основных электроакустических характеристик с помощью разработанного для его эксплуатации излучающего и контрольно-измерительного тракта, а также работа в длительном режиме излучения сложных сигналов на стоянке и в дрейфе судна обеспечения со скоростью от 0.1 до 0.6 узла. Кроме того, были впервые проведены испытания НЧИ и его калибровка с определением полосы рабочих частот при погружении до 150 м без компенсации гидростатического давления.

При погружении НЧИ для исследования его основных характеристик угловая стабилизация положения корпуса, а также положение штанги с контрольным гидрофоном обеспечивалась при помощи оттяжек вдоль борта судна от гидроакустической штанги и рамы НЧИ на корму и форштевень.



Рис. 7. НЧИ с установленной на опоре штангой с контрольным гидрофоном.

На излучатель от системы генерации сигналов подавались ЛЧМ-сигналы в диапазоне 200–700 Гц, а также тональные сигналы на ряде фиксированных частот. В ходе измерений последовательно излучалось 6 тональных сигналов с периодом повторения 60 с и паузой между сигналами 40 с. Синхронно с излучением звука производилась регистрация сигнала возбуждения НЧИ, тока и напряжения на НЧИ, а также сигнала с контрольного гидрофона. Характерный вид зависимости излучаемого в эксперименте НЧИ Бикон-2 эффективного акустического давления от частоты представлен на рис. 8.

Для обработки тональных сигналов записанные системой регистрации данные каждого сигнала разбивались на 300 равных интервалов (длительность каждого интервала составляла 67 мс, и в каждый интервал укладывалось от 20 до 40 периодов несущей частоты). Для каждого интервала рассчитывались среднеквадратичные значения приведенного к 1 м эффективного значения развиваемого звукового давления, тока и напряжения на НЧИ. Обработка ЛЧМ-сигналов заключалась в разбиении зарегистрированных данных каждого сигнала на 250 (или 300) равных интервалов (при этом в каждом интервале частота ЛЧМ-сигнала менялась на 2 Гц), и расчете в каждом интервале среднеквадратичных значений приведенного к 1 м развиваемого излучателем звукового давления, тока и напряжения на НЧИ. В ходе измерений последовательно излучалось 6 серий ЛЧМ-сигналов с периодом повторения 60 с и паузой между сигналами 40 с.

При обработке записей излучаемых фазоманипулированных сигналов зарегистрированные данные каждого сигнала разбивались на равные интервалы длительностью 200 мс (каждый интервал содержал по 80 периодов несущей частоты сигнала). Далее для каждого интервала рассчитывались среднеквадратичные значения тока, напряжения на НЧИ и приведенного к 1 м развиваемого им звукового давления.

Как показали эксперименты, увеличение глубины погружения НЧИ до 150 м не оказывает

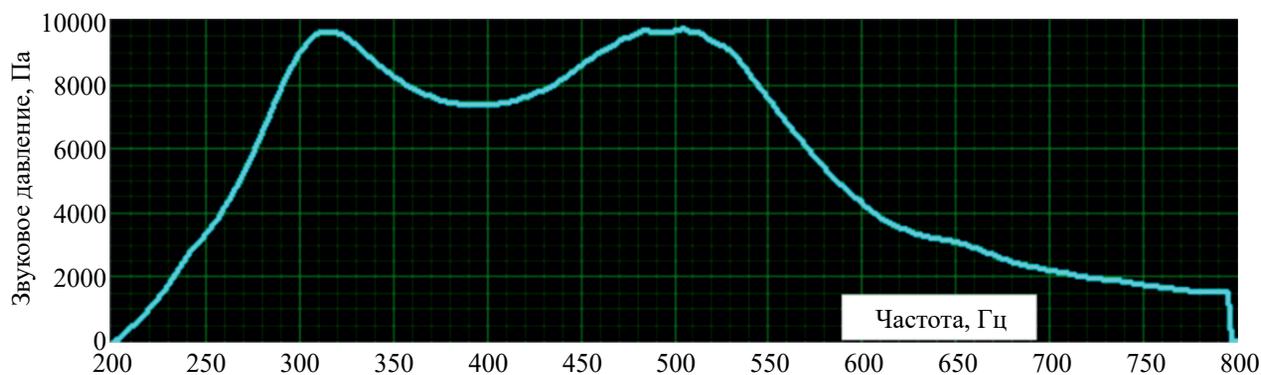


Рис. 8. Развиваемое эффективное акустическое давление (приведенное к 1 м) расположенным на глубине 150 м НЧИ. Индуктивность согласующего дросселя 50 мГн.

существенного влияния на его основные характеристики: дрейф резонансной частоты составил не более 2%, а изменение приведенного к 1 м среднеквадратичного звукового давления на частоте резонанса находилось в пределах 5%, что практически не выходит за пределы погрешности электроакустических измерений.

По итогам проведенных испытаний с измерениями акустических параметров, НЧИ успешно применялись для реализации двух сценариев исследования температурных режимов на двух разномаштабных трассах в Японском море: 144 и 1073 км.

На акустической трассе протяженностью 144 км от м. Лихачева (позиция НЧИ) до залива Посьета (позиция приемника в дрейфе), включающей участок шельфа длиной более 50 км, была апробирована возможность приема в глубоком море на горизонтах, значительно превышающих глубину оси ПЗК (вплоть до 1000 м), сигналов, излучаемых расположенным у побережья НЧИ. На акустической трассе протяженностью 1073 км от позиции НЧИ на шельфе вблизи поселка Чехов (о. Сахалин) до банки Кито-Ямато (позиция приемника в дрейфе), с последующим приемом на глубине ПЗК, впервые апробирована методика восстановления средней температуры из данных о скорости звука в сопряженных звуковых каналах шельфа и глубокого моря на дистанциях масштаба акватории Японского моря. Схема эксперимента представлена на рис. 9.

Во время эксперимента НЧИ типа Бикон-2 вывешивался с борта судна обеспечения в прибрежной зоне п. Чехов (о. Сахалин) на глубине 41 м и на удалении 5 км от свала глубин. Размещение излучателя в такой точке продиктовано наличием придонного звукового канала на шельфе, что позволило использовать эффект акустического “оползня” [12], т.е. явления перехода акустической энергии из придонной области шельфа на ось ПЗК в глубоком море, что обеспечивает максимально близкую к прямой траекторию распространения акустических сигналов. Каждые 6 минут в течение 8 часов выполнялось зондирование среды набором фазоманипулированных псевдослучайных сигналов на основе М-последовательностей и

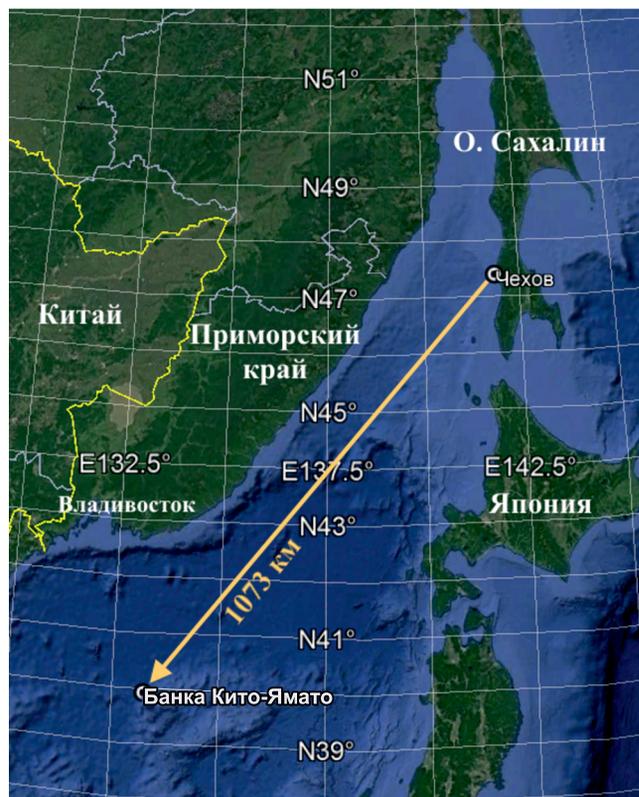


Рис. 9. Схема эксперимента по акустической термометрии на трассе п. Чехова–банка Кито-Ямато.

последовательности Баркера с центральной частотой 400 Гц, отличающихся длительностью и полосой частот (табл. 2). Звуковое давление, приведенное к 1 метру от излучателя, достигало 10000 Па.

На рис. 10 приведены автокорреляционные функции электронных масок излучаемых сигналов. Как видно из рисунка, амплитуда автокорреляционной функции прямо пропорциональна длительности сигнала, а ширина равна двум длительностям символа, которая может быть рассчитана как n/f , где f — несущая частота сигнала, n — количество периодов несущей частоты на символ.

Постановка и сопровождение приемной системы, радиогидроакустического буя (РГБ), в районе

Таблица 2. Параметры сигналов излучаемого пакета.

Обозначение сигнала	Длина последовательности, символов	Количество периодов несущей частоты на символ	Длительность, с	Полоса, Гц
M127_40	127	40	12.70	400±10
M127_100		100	31.74	400±4
M1023_4	1023	4	10.23	400±100
M1023_16		16	40.92	400±25
M2047_8;	2047	8	40.97	400±50
Баркер	13	400	13.00	400±1

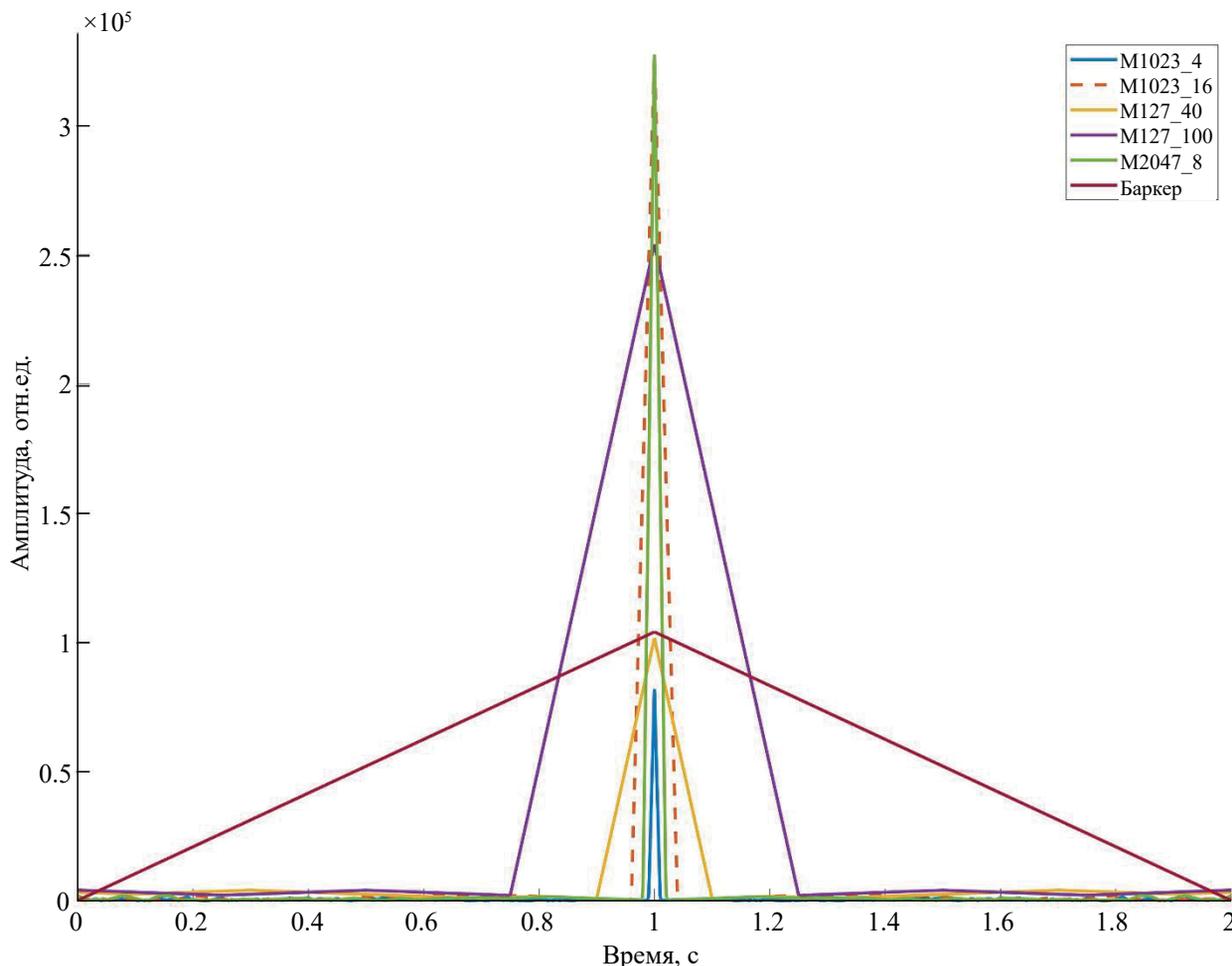


Рис. 10. Автокорреляционные функции электронных масок излучаемых сигналов.

банки Кито-Ямато производились малозумным плавсредством — парусно-моторной яхтой, с борта которой STD-зондом предварительно выполнялись гидрологические измерения с целью определения положения оси ПЗК. В соответствии с этой глубиной выбором длины кабельной линии определялось положение гидрофона.

После постановки РГБ находился в свободном дрейфе. Координаты дрейфа каждую секунду фиксировались приемником GPS для расчета дистанций между НЧИ и РГБ, что необходимо для вычисления скорости звука и последующего восстановления средней температуры среды в сопряженных ПЗК.

Все излученные сигналы регистрировались приемной системой, после чего для определения структуры импульсного отклика канала выполнялась их корреляционная обработка. На рис. 11 приведен пример типичного импульсного отклика набора сигналов на момент времени 11:54 по часам на судне, обеспечивающем излучение НЧИ.

Горизонтальные линии на рис. 11 соответствуют максимальному уровню окружающего шума, измеренного по максимуму корреляционной функции дополнительного сигнала, модулированного

ортогональному основному сигнальному пакету последовательностью [10]. Превышение сигнала над окружающим шумом составляло от 1.5 до 13.0 раз (рис. 12), при этом для коротких сигналов — 1.5–5.5 раз и 2.0–13.0 раз — для длинных.

Дистанция между точками излучения и приема определялась каждую секунду с помощью GPS-приемников, установленных на обоих респондентах. По полученным импульсным откликам определялся последний приход сигналов, превысивший порог максимума корреляционного шума. Время регистрации этого пика соответствует времени пробега сигналов по траектории, наиболее близкой к оси ПЗК, т.е. в слое с наименьшими значениями скорости звука. По известным временам и расстояниям между источником и приемником рассчитывалась эффективная скорость звука, которая затем восстанавливалась по формуле Чена–Миллера (ЮНЕСКО) [13] в значения температуры на оси ПЗК. На рис. 13 представлен трехчасовой фрагмент полученных значений для 4 типов сигналов, имеющий наибольшее временное разрешение (наименьшее количество периодов несущей частоты на символ, см. табл. 3). Среднее значение скорости

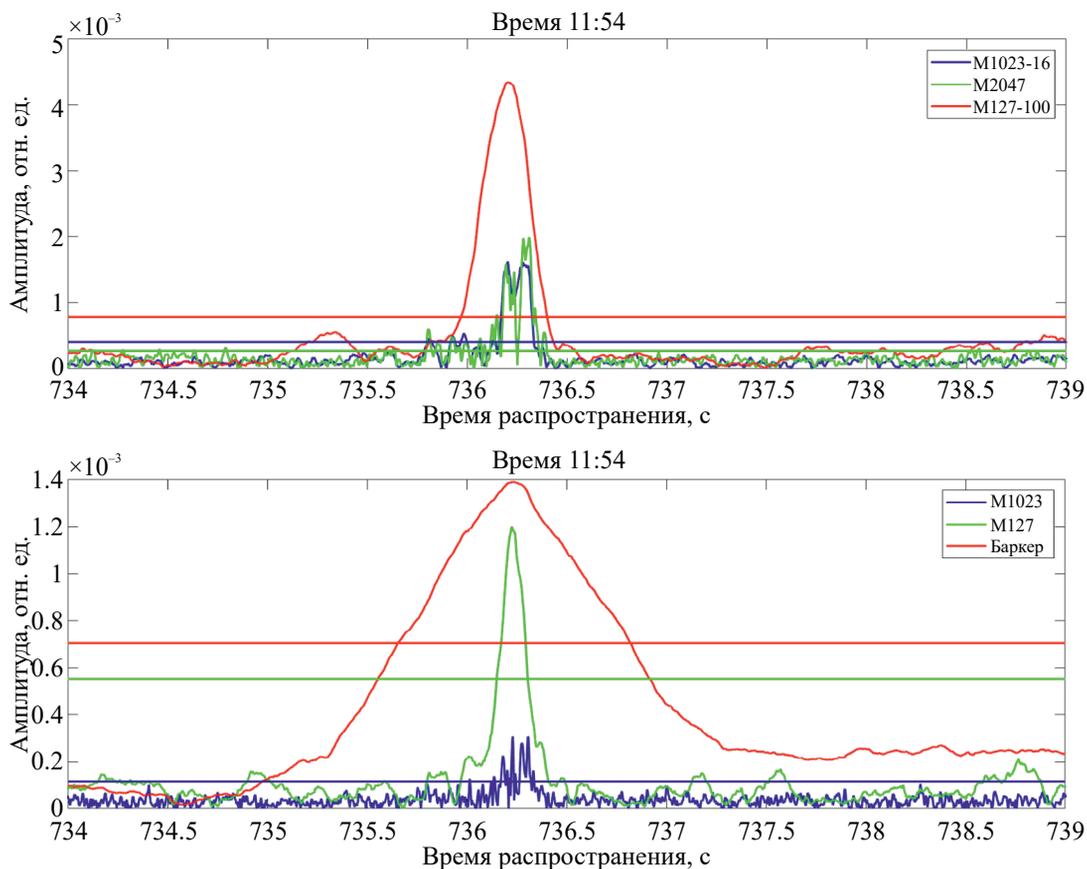


Рис. 11. Типичный импульсный отклик набора излучаемых сигналов.

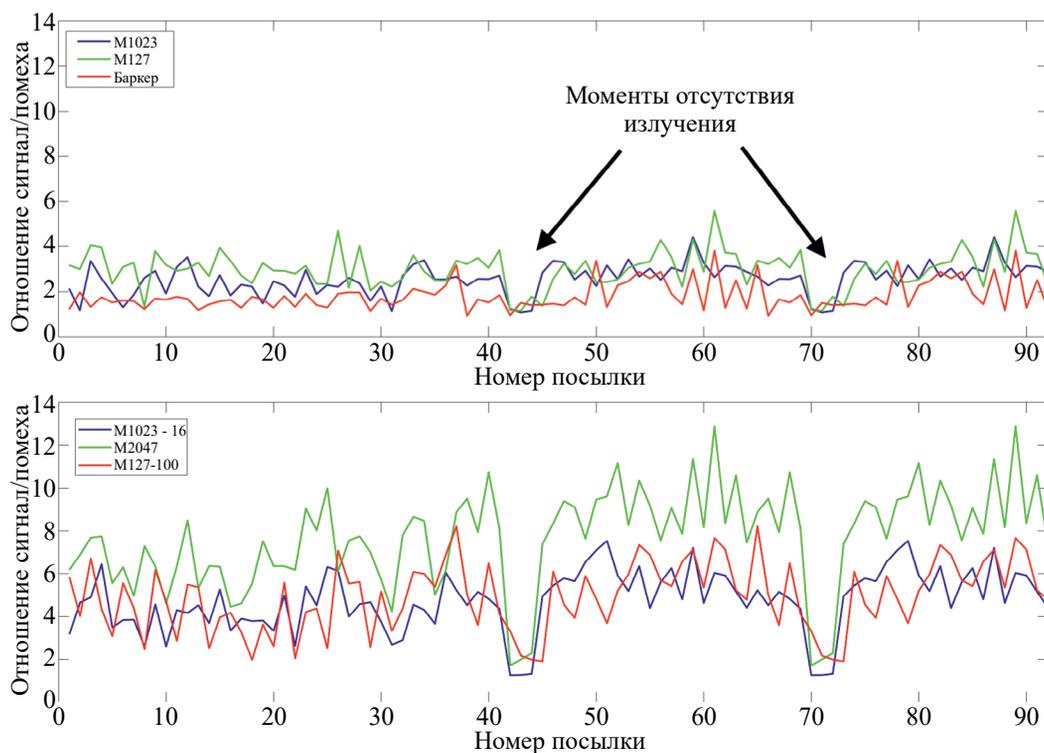


Рис. 12. Отношение сигнал/помеха для набора сигналов (а) — малой (до 13 с) и (б) — большой длительности (более 30 с). Перерывы в работе оборудования отмечены стрелками.

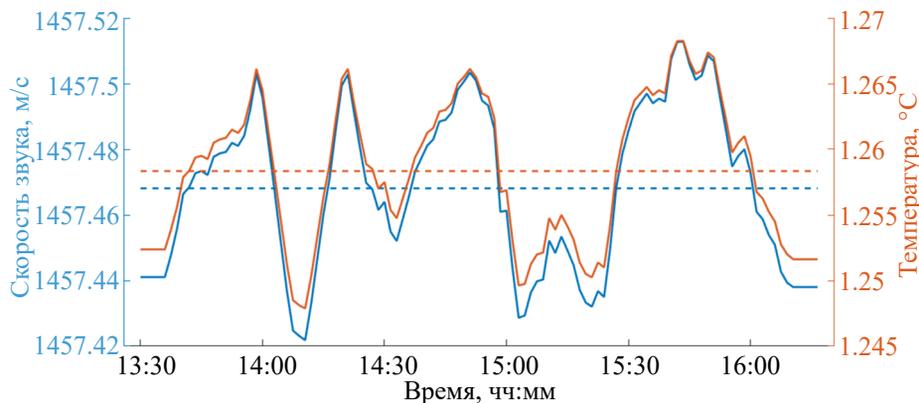


Рис. 13. Результаты измерения эффективной скорости звука и температуры на оси ПЗК вдоль трассы. Пунктирными линиями обозначены средние значения величин на всем фрагменте.

Таблица 3. Параметры ПЗК вдоль акустической трассы, измеренные STD-зондом.

№	Дистанция, км	Мин. скорость звука, м/с	Температура, °C	Глубина, м
1	0	1466.025	3.94	41.4
2	271.3	1456.678	1.116	228.5
3	404.3	1457.067	1.041	272.4
4	652.5	1457.567	0.988	317.5
5	1073	1457.076	1.096	242.9
Среднее, без учета шельфа		1457.097	1.060	265.3

звука составило 1457.47 м/с при среднеквадратичном отклонении 0.05 м/с, что соответствует значениям температуры 1.25°С при среднеквадратичном отклонении 0.01°С. Значение отклонения в 0.01°С полностью соответствует инструментальной погрешности метода, оцененной как [14]:

$$\Delta C = \frac{L}{\tau^2} \Delta \tau,$$

где L — протяженность акустической трассы, м; τ — время распространения, с; $\Delta \tau$ — длительность символа М-последовательности, с.

При пересчете по формуле Чена-Миллера погрешность расчета температуры для сигнала М1023 (4 периода на символ, лучшее временное разрешение) составит величину $\Delta t = 0.007^\circ\text{C}$. Для сигнала М127 с длительностью символа, равной 0.1 с, погрешность расчета температуры $\Delta t = 0.044^\circ\text{C}$ (40 периодов на символ, худшее временное разрешение из четверки выбранных для расчета температуры сигналов).

По окончании акустических измерений была проведена гидрологическая съемка вдоль акустической трассы. STD-зонд опускался в точке постановки излучателя и на дистанциях 271.3, 404.3, 652.5 км от нее, а также в точке приема. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, усредненное значение скорости звука, полученное по данным STD-измерений, несколько ниже рассчитанных. Даже учет шельфового участка длиной 13 км при трассе длиной 1073 км дает среднее значение скорости звука 1457.21 м/с. Для анализа несоответствия были привлечены данные лагранжевой карты длин траекторий пассивных маркеров для Японского моря по данным поля скорости AVISO [15, 16]. Темный цвет (рис. 14) 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 так же проходит через теплый антициклонический вихрь, имеющий даже большую динамику (выделен красным квадратом на рис. 14). Эти данные можно считать объяснением того факта, что полученная в результате акустической термометрии величина средней скорости звука по трассе несколько выше средней, полученной по данным STD.

По итогам эксперимента установлено, что предложенные технические и методические решения могут успешно применяться для оценки вариаций значений температуры в слое ПЗК вплоть до сотых °С на дистанциях, превышающих 1000 км,

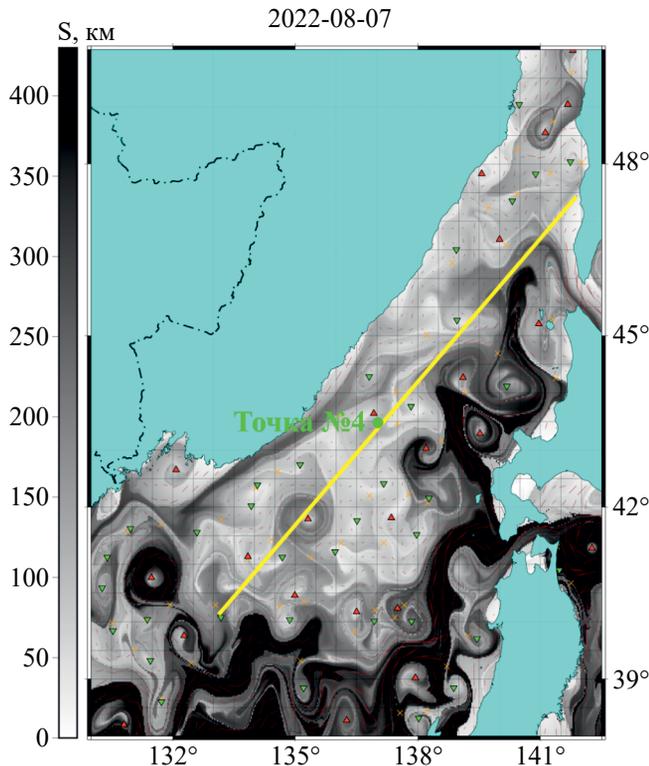


Рис. 14. Лагранжева карта длин траекторий (в км) за 30 суток по данным поля скорости AVISO. Темный цвет соответствует областям активной адвекции водных масс. Красные и зеленые треугольники — центры антициклонов и циклонов, соответственно. Оранжевые крестики — гиперболические точки. Желтая линия — акустическая трасса.

а мощности используемого излучателя типа Бикон-2, разработанного ИПФ РАН, вполне достаточно для обеспечения приемлемого соотношения сигнал/шум в точке приема. Наиболее удачными из представленных сигналов с точки зрения помехоустойчивости и временного разрешения для данной трассы оказались M1023_16 и M2047_8. Стоит отметить, что дополнительно проведенное моделирование распространения акустических сигналов позволило уточнить горизонтальные размеры синоптического вихревого образования, пересекавшего акустическую трассу во время эксперимента [17, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использованные инженерные решения ИПФ РАН при создании линейки мощных низкочастотных широкополосных излучателей типа Бикон позволяют добиться высоких электроакустических показателей изготовленных образцов. Результаты испытаний и измерений электроакустических параметров НЧИ, а также опыт их эксплуатации в Японском море, показали возможность организации акустических трасс с применением НЧИ в целях реализации систем регионального

мониторинга температурных режимов подводных звуковых каналов.

В экспериментальных исследованиях на трассе п. Чехов—банка Кито-Ямато выявлено и оценено влияние синоптического вихря на формирование условий распространения звука в ПЗК. Результаты эксперимента подтверждают, что предложенные технические и методические решения могут успешно применяться для оценки вариаций значений температуры в слоях ПЗК вплоть до сотых долей °С, что доказывает перспективность развития систем регионального мониторинга на базе методов акустической томографии.

По результатам экспериментальных исследований, в том числе по наблюдаемым соотношениям сигнал/помеха, установлено, что развиваемое НЧИ типа Бикон-2 акустическое давление в 10–13 кПа является достаточным для организации в Японском море акустических трасс на основе сопряженных ПЗК общей длиной более 1000 км.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН “Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред” (регистрационный номер 124022100075-6) и государственного задания ИПФ РАН “Распространение акустических волн в морской среде и верхнем слое земной коры” (проект FFUF-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howe B.M., Anderson S.G., Baggeroer A.B., Colosi J.A., Hardy K.R., Horwitt D., Karig F.W., Leach S., Mercier J.A., Metzger K., et al. Instrumentation for the Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC) prototype Pacific Ocean network // Proc. Conference ‘Challenges of Our Changing Global Environment’. OCEANS’95 MTS/IEEE, San Diego, CA, USA, 9–12 October 1995. P. 1483–1500.
2. Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (ATOC) // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 105. № 2. P. 982.
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 формирование импульсной характеристики в глубоком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
4. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Оценки эффективной скорости распространения низкочастотных фазоманипулированных сигналов на протяженных трассах при сложных гидролого-акустических условиях и переменном рельефе дна // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 2(6). С. 58–63. EDN KYIWL
5. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Любавин Л.Я. Восстановление средней температуры океана по измерениям времени пробега звуковых импульсов // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 2. С. 216–225.

6. *Зверев В.А., Голубев В.Н., Коротин П.И.* Условия выделения лучей по времени их прихода на больших расстояниях и низких частотах // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 2. С. 163–169.
7. *Зверев В.А., Стромков А.А.* Увеличение временной селекции сигналов, принимаемых по лучам при зондировании океана посредством М-последовательности // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 514–518.
8. *Римский-Корсаков А.В. и др.* Акустические подводные низкочастотные излучатели. Л.: Судостроение, 1984. 184 с.
9. *Morozov A.K. and Webb D.C.* A Sound Projector for Acoustic Tomography and Global Ocean Monitoring // IEEE J. Oceanic Engineering. 2003. V. 28. No 2. P. 174–185.
10. *Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И.* Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
11. *Бритенков А.К., Фарфель В.А., Боголюбов Б.Н.* Сравнительный анализ электроакустических характеристик компактных низкочастотных гидроакустических излучателей высокой удельной мощности // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 72–77. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-3-72-77>
12. *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. V. 111. № 2. P. 757.
13. *Chen C.-T., Millero F.J.* Speed of sound in seawater at high pressures // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 62 (5). P. 1129–1135.
14. *Kaneko A., Zhu X.H., Lin J.* Coastal acoustic tomography // Coast. Acoust. Tomogr. 2020. P. 1–362. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04180-8>
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. V.109. P. 61–75.
16. *Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V.* Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean // Physics of Earth and Space Environments. Springer, 2017.
17. *Dolgikh G., Morgunov Y., Burenin A., Bezotvetnykh V., Luchin V., Golov A., Tagiltsev A.* Methodology for the Practical Implementation of Monitoring Temperature Conditions over Vast Sea Areas Using Acoustic Thermometry // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. P. 137. <https://doi.org/10.3390/jmse11010137>
18. *Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Войтенко Е.А., Лебедев М.С., Разживин В.В., Каплуненко Д.Д., Шкрамада С.С.* Экспериментальное тестирование акустической термометрии в масштабе Японского моря с размещением приемной системы на оси подводного звукового канала // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 5. С. 559–568. <https://doi.org/10.31857/S0320791923600348>

Examination of the Broadband Low-Frequency Emitters in the Study of Temperature Regimes in the Sea of Japan

B. N. Bogolyubov^a, A. K. Britenkov^a, D. A. Kasyanov^a, V. A. Farfel^a, Yu. N. Morgunov^b, V. V. Besotvetnykh^b, E. A. Voitenko^b, A. A. Golov^{b,*}, A. A. Tagiltsev^b

^a*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS) Ulyanova 46, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

^b*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (POI FEB RAS) Baltiyskaya Street 43, Vladivostok, 690041, Russia*

Phone: (423-2)311-613; Fax: (423-2)312-600

*e-mail: golov_alexander@inbox.ru

The use of technical means and methods of low-frequency hydroacoustics for monitoring the variability of average temperatures of underwater sound channels in the Sea of Japan is considered. A review of the characteristics of the line of powerful inter-piston hydroacoustic emitters developed by the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, developed by the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, is carried out, promising for organizing long acoustic routes. The results of measurements of the electroacoustic characteristics of low-frequency hydroacoustic emitters under natural conditions at depths of up to 150 m are presented, and the use of these emitters for studying the temperature regimes of associated underwater sound channels of the shelf and deep sea on multi-scale long routes in the Sea of Japan is also considered. Based on the processing of experimental data on an acoustic path with a length of about 1000 km, obtained in 2022, examples of the reconstruction of average water temperature values from data on the speed of sound along the acoustic path are given, the sensitivity of the method is assessed, and the signal-to-noise ratio values achieved in the experiment are analyzed.

Keywords: acoustic thermometry, low-frequency hydroacoustic emitter, acoustic power, underwater sound channel, correlation function, M-sequence, Barker sequences.