

ЛИТЕРАТУРА

1. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В. Акустическая томография динамических процессов в шельфовой зоне моря с использованием сложных сигналов // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 1. С. 5–11.

2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Войтенко Е.А., Каменев С.И., Леонтьев А.П., Моргунов Ю.Н. Акустические дистанционные измерения течений на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2004. Т. 50, № 5. С. 581–584.

3. Гидроакустический комплекс для дистанционного мониторинга гидрофизических параметров в мелководных акваториях. Патент 115929 Российская Федерация / В.В. Безответных, Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, А.А. Тагильцев. № 2012100170/28; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.05.2012.

4. Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Стробыкин Д.С. Экспериментальные исследования влияния прилива на формирование акустического поля на стационарной трассе в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 4. С. 587–588.

5. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Аппаратно-программный измерительный комплекс для исследований в области акустической навигации // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 1–5.

6. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Мобильный навигационный комплекс для обеспечения миссий подводных аппаратов в прибрежных акваториях // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 89–94.

7. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Мобильный аппаратно-программный комплекс для исследований в области подводной навигации // Подводные исследования и робототехника. 2011, № 1(11). С. 59–63.

8. Mackenzie K.V. Nine-term Equation for Sound Speed in the Oceans // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. Vol. 70. P. 807–812.

УДК 534.2:551.463.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИЕМА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ВБЛИЗИ ДНА И В ГРУНТЕ НА ШЕЛЬФЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

**Е.А. Войтенко,
Ю.Н. Моргунов**

Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева» ДВО РАН¹

В томографических методах мониторинга температурных полей в морской среде используются акустические средства. Эффективным и безопасным способом размещения приемных устройств на акватории с сильным течением и интенсивным рыболовством может быть заглубливание их до дна или в грунт. При этом лучевая структура акустического поля на трассе между корреспондирующими точками формируется таким образом, что появляется возможность выделить, идентифицировать и измерить времена распространения импульсов в отдельных слоях диагностируемого волновода. По измеренным данным рассчитываются скорость распространения звука в соответствующих слоях и температура среды, связанные между собой известными выражениями. Методика позволяет проводить анализ импульсных характеристик с использованием псевдослучайных сигналов типа М-последовательностей и взаимной корреляционной обработки излученных и принятых сигналов. Идентичность импульсных характеристик, полученных экспериментально при размещении гидрофонов вблизи дна (0,4 м) и в грунте (0,4 м), указывает на возможность решения задач акустической термометрии и звукоподводной связи при скрытной постановке приемных систем в грунте. Данная методика и технические средства разработаны в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН). Результаты натурных экспериментов и численного моделирования демонстрируют перспективность их применения для мониторинга динамики и структуры вод в шельфовых зонах.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение акустических методов в практику океанологических измерений и мониторинга гидрофизических параметров морской среды во многом зависит от экономической и технической целесообразности их применения. Например, акустическая томография динамики и структуры вод имеет

несомненные преимущества перед традиционно используемыми океанологами методами и приборами. Вместе с тем для решения многих задач требуется построение сложных, громоздких и дорогостоящих систем. Так, реконструкция полей течений и температур в вертикаль-

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43.
E-mail: Evgeni@poi.dvo.ru



ной плоскости по данным акустического зондирования требует размещения на диагностируемой акватории вертикально развитых приемно-излучающих антенн для измерения угловой структуры акустического поля. В работах [1–3] авторами обсуждались экспериментальные результаты томографического исследования полей течений и температур, которые были получены при использовании оди-

ночных приемников и источников звука, размещаемых вблизи дна. Отмечалось, что полученные данные могут быть применены для повышения точности акустических навигационных систем подводных аппаратов, функционирующих на конкретной акватории [4]. Одной из основных проблем при технической реализации томографических схем является эффективное и безопасное размещение приемопе-

редатчиков на акватории. В настоящей статье приводится описание двух экспериментов, результаты которых могут быть использованы для обоснования выбора мест и глубин размещения источников и приемников сигналов при проектировании томографических комплексов, разрабатываемых для контроля и мониторинга полей температур и течений в шельфовых зонах Японского моря.

1. Технические средства и методики проведения эксперимента в открытой части залива Посьета

На акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН у мыса Шульца были проведены исследования импульсного отклика канала распространения сигналов в зависимости от глубины приема при размещении источника сигналов вблизи дна. Другие варианты заглубления источников в данной работе не рассматриваются, т.к. многочисленные работы авторов в области прикладной гидроакустики (акустическая томография, навигация, звукоподводная связь) доказали, что для большинства практических задач, решаемых на расстояниях в десятки и сотни километров, подобное размещение эффективно [5–10]. Цель эксперимента, проведенного в открытой части залива Посьета, заключалась в исследовании возможности качественного приема зондирующих сигналов при размещении гидрофонов вблизи дна без потери полезной информации о структуре акустического поля во всей толще диагностируемого волновода. На рис.1 приведена схема размещения измерительных средств на акватории.

На рис. 2 приведены блок-схемы стационарно установленных излучающей (рис. 2, А) и приёмной (рис. 2, Б) систем.

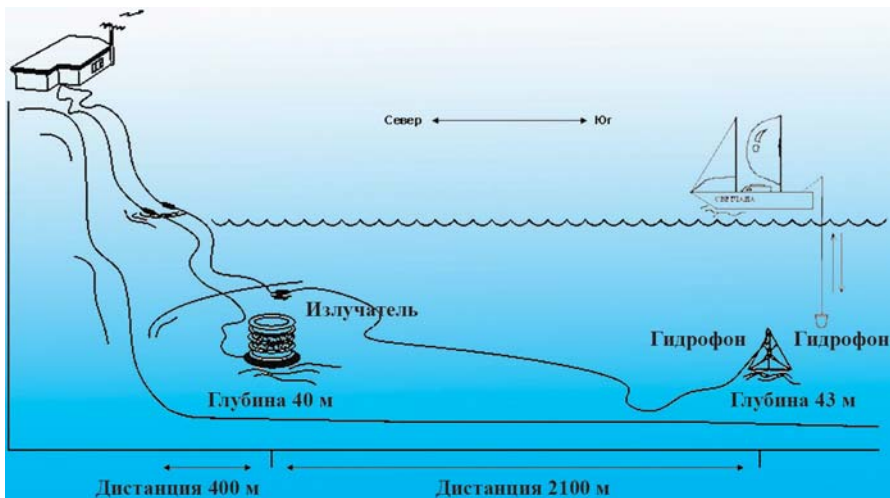


Рис. 1. Схема эксперимента

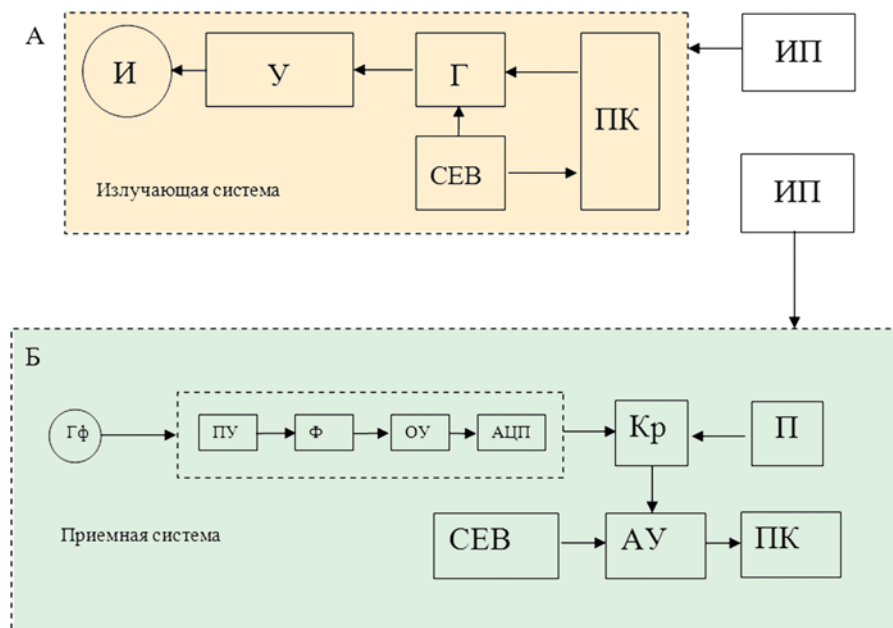


Рис. 2. Блок-схема излучающей (А) и приёмной (Б) систем: Гф – гидрофон; ПУ – предварительный усилитель; Ф – фильтр; ОУ – операционный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; Кр – коррелятор; АУ – арифметическое устройство; ПК – персональный компьютер; И – акустический излучатель; У – усилитель мощности; Г – система генерации акустических сигналов; СЕВ – система единого времени; ИП – источник питания; П – память с записью маски излучаемого сигнала

Схема генерации акустических сигналов, управляемая системой единого времени (СЕВ), построена на считывании предварительно сформированных и записанных на флэш-память сигналов. СЕВ, выполненная с применением высокостабильных термостатированных кварцевых генераторов ГК103-ТС-М, с относительной нестабильностью 10^{-8} , предназначена для счета реального времени и синхронизации излучающего и приемного трактов. Кроме этого в ее функции входит формирование сигналов высокостабильной тактовой частоты, задаваемой в широком диапазоне от единиц герц до сотен килогерц, и меток времени от 1 секунды до нескольких суток. Принятые акустические сигналы усиливаются и фильтруются (перепрограммируемый фильтр 4-го порядка фирмы «Maxim» MAX262). Далее сигналы поступают в АЦП, и результаты оцифровки подаются на вход программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) фирмы «Altera» семейства Асех EP1K50TC144, в которой реализован алгоритм вычисления корреляционной функции. Результат вычисления непрерывно поступает на вход арифметического устройства, в котором реализован алгоритм определения амплитуд и времен приходов акустической энергии. Управление работой схем излучения и приёма выполняется при помощи микроконтроллера фирмы «Atmel» AT90S8535.

2. Результаты измерений и интерпретация полученных результатов

Акустический излучатель, удаленный от берега на 400 м (рис. 1) и размещенный в 1 м от дна при глубине моря 40 м, осуществлял излучение сигналов каждую минуту в течение проведения эксперимента с 20:00 до 20:00 часов

следующих суток. Управление режимами излучения осуществлялось по кабелю с берегового поста. В качестве зондирующего использовался сигнал, фазоманипулированный М-последовательностью с несущей частотой 2500 Гц и шириной полосы 1250 Гц. Применение сигналов такого типа позволяет разделить во времени и идентифицировать акустические импульсы, прошедшие между корреспондирующими точками по различным лучевым траекториям, путем взаимной корреляционной обработки принятых и излученных сигналов. Полученные таким образом импульсные характеристики диагностируемого волновода могут эффективно использоваться для высокоточного измерения времени прохождения сигналов по лучевым траекториям для решения широкого круга прикладных задач. На удалении 2092 м от излучателя осуществлялся прием сигналов на гидрофон, стационарно установленный в 30 см от дна. Вблизи точки расположения стационарного приёмного гидрофона с яхты, установленной на якорь, производилось гидрологическое зондирование STD-зондом и прием сигналов на гидрофон, который опускали до дна, затем поднимали до поверхности с шагом один метр. Зарегистрированные акустические сигналы проходили через блок предварительного усиления с последующей оцифровкой и сохранением на персональном компьютере для обработки и анализа.

Принятые гидрофонами сигналы сворачивались с маской излученного, т.е. определялись импульсные характеристики канала распространения. На рис. 3, *г* приведены экспериментально полученные импульсные характеристики на стационарном гидрофоне. Сопоставление гидрологических (рис. 3, *б*) и акустических (рис. 3, *г*)

данных показало, что размещение излучателя и приемника вблизи дна на границах диагностируемой трассы позволяет сформировать импульсную характеристику канала, которая по временам приходов импульсов напрямую связана со средней температурой в тех слоях, по которым эти импульсы распространяются. Как видно, с 20:00 до 06:00 часов и с 17:00 до 20:00 регистрируются максимальные значения амплитуды поздних приходов акустической энергии, т.к. в эти часы наблюдается заход холодных приливных вод в придонный слой и основная энергия концентрируется в придонном звуковом канале. С 06:00 до 17:00 при отливе наблюдается опускание теплых вод до дна, и энергия перераспределяется по всей глубине. По данным батиметрической и гидрологической съемки были рассчитаны амплитудно-временные диаграммы прихода собственных лучей на горизонт приема в области постановки приемных систем (рис. 3, *в*). Моделирование осуществлялось с использованием программы BELLHOP из приложения AcToolBox [11]. Хорошее соответствие экспериментальных данных и теоретического моделирования процесса распространения импульсных сигналов в контролируемых гидрологических условиях подтверждает правильность идентификации импульсов и позволяет рассчитывать на качественное восстановление поля температур по данным акустического зондирования.

Следует отметить, что зависимости, приведённые на рис. 3, *б*, *в*, имеют сдвиг приблизительно в два часа относительно зависимости, приведённой на рис. 3, *г*. Это связано с тем, что температурные данные и расчет приведены для точки приема, а заполнение всего волновода на трассе холодной

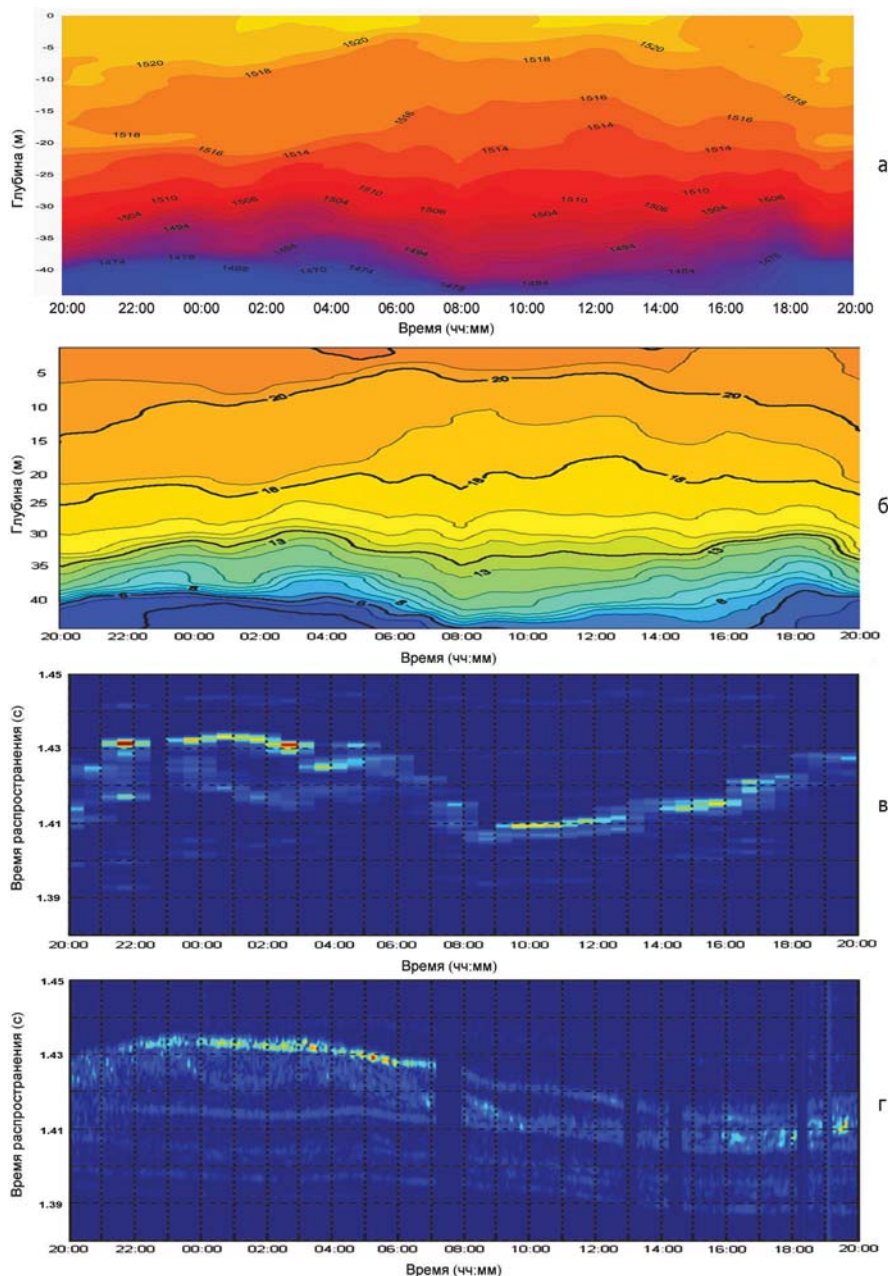


Рис. 3. Профиль скорости звука (а); зависимость температуры воды от времени суток и глубины (б); вариации импульсной характеристики волновода: в – рассчитанные, г – полученные экспериментально

(или теплой) водой происходит в течение двух часов со скоростью около 10 см/с.

Более полные данные были получены при анализе вертикальной структуры поля с опускаемого гидрофона (рис. 4). На рис. 4, б, во время отлива, четко разделяются три группы импульсов. Самые «быстрые» распространяются по кратчайшему расстоянию в теплых слоях волновода, но не проникают

в верхний прогретый 10-метровый слой. Чтобы их идентифицировать при приеме на донный гидрофон, понадобилась бы дополнительная информация о температуре в поверхностном слое. Вторая группа фиксируется во всем волноводе и формируется импульсами с отражениями от поверхности и дна. Третья группа формируется импульсами, прошедшими в придонном 4-метровом холодном

слое волновода. В момент прилива (рис. 4, а, в) фиксируются очень слабые импульсы в верхних слоях и мощные приходы в придонном 10-метровом слое.

3. Экспериментальные исследования распространения сигналов в грунте

Практика долговременного функционирования измерительных систем в шельфовых зонах показывает, что придонного размещения излучающих и приемных систем для снижения рисков их повреждения в районах активного рыболовства бывает недостаточно. Идеальным выходом является размещение приемных систем в грунте при условии, если полезная сигнальная информация не будет потеряна.

Целью эксперимента, обсуждаемого в данном разделе, являлось исследование импульсных характеристик волновода при синхронном приеме сложных фазоманипулированных сигналов в воде и в грунте. Экспериментальная трасса распространения акустических сигналов была организована в бухте Витязь в заливе Посьета Японского моря (рис. 5). Для реализации поставленной задачи применялись технические средства, описанные в разделе 1 (см. рис. 2).

Широкополосный источник сложных сигналов с центральной частотой 2500 Гц располагался вблизи дна в прибрежной части бухты на глубине 10 м. Излучались М-последовательности длиной 511 символов. На один символ приходилось 4 периода несущей частоты. На расстоянии 2 километра от излучателя на другой стороне бухты была организована приёмная станция на основе двух гидрофонов. Один из них располагался в воде на расстоянии 0,4 ме-

тра от дна, а другой был помещен в песчаный грунт на глубину 0,4 метра. Глубина моря в месте расположения приёмной станции также составляла 10 метров, а в середине бухты – 38 метров. Вертикальное распределение скорости звука на трассе имело отрицательный градиент. Следовательно, импульсная характеристика в точке приема формировалась по лучевым траекториям, претерпевшим различное количество отражений между дном и поверхностью. Сигналы излучались и регистрировались каждую минуту в течение четырёх одночасовых сеансов. Обработка информации заключалась в вычислении взаимной корреляционной функции между принятыми и излучаемыми сигналами для получения импульсной характеристики данного волновода.

На рис. 6 приведен один из фрагментов часовой записи импульсного отклика волновода с водного и грунтового гидрофонов.

На обеих частях рисунка можно отметить до десяти идентичных по амплитуде и временным задержкам приходов акустической энергии. Следовательно, появляется возможность по данным с грунтового гидрофона осуществлять мониторинг изменчивости гидрофизических процессов на данной акватории по отработанным методикам с приемными системами, находящимися в воде. Кроме того, тот факт, что на грунтовом гидрофоне обеспечивается качественный прием кодовой последовательности, свидетельствует о возможности передачи на него команд управления и цифровой информации. Таким образом, можно констатировать, что акустическая волна, несущая сигнальную информацию, в данном случае распространяется без дополнительных потерь и искажений в волноводе, состоящем из водного

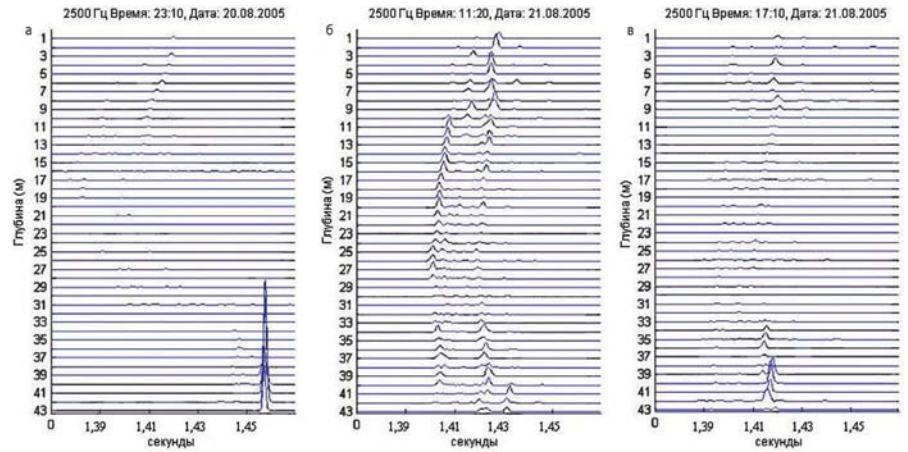


Рис. 4. Вертикальная структура акустического поля

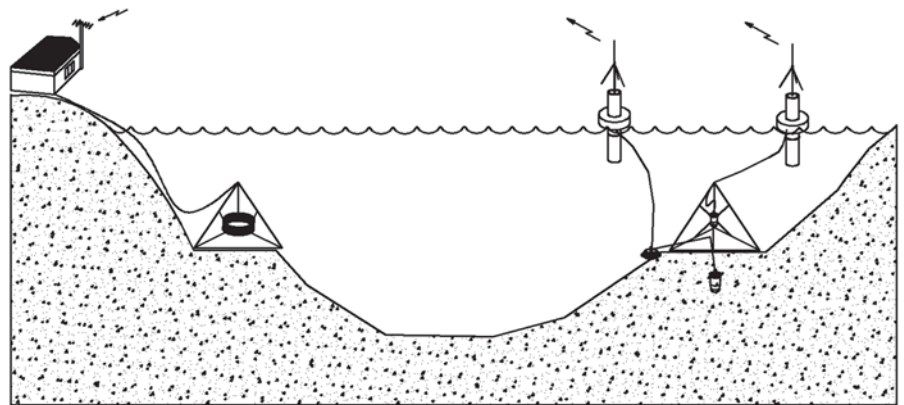


Рис. 5. Схема эксперимента

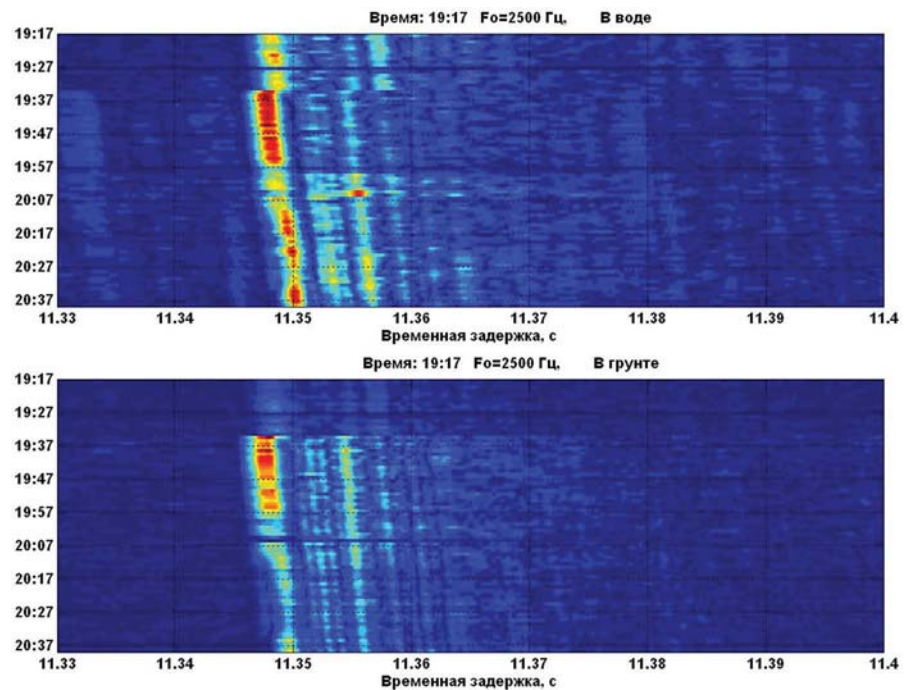


Рис. 6. Фрагмент часовой записи импульсной характеристики волновода на водный и грунтовый гидрофоны

слоя и как минимум сорокасантиметрового слоя песчаного жидкого грунта.

Кроме практического применения зафиксированного явления (например, дистанционный подрыв какого-либо замаскированного в грунте устройства по команде) можно отметить также важную особенность формирования акустического поля источника при его размещении вблизи грунта с такими же свойствами. Появляется дополнительный подводный звуковой канал до глубины залегания твердых пород, который может обладать фокусирующим свойством при распространении акустической энергии. Важное применение данного явления касается применения векторных приемников. Размещение их в грунте позволяет исключить их крепление на упругой

связи с резонансной частотой подвески, т.е. рабочий диапазон может быть расширен вниз. Кроме этого отпадает необходимость размещения звукоприемника в обтекатель [12]. Это является актуальным и для гидрофонов при работе в районах с сильными придонными течениями.

Приведенные в данном разделе результаты могут найти широкое применение при выполнении различных практических задач в морских технологиях, но, безусловно, требуют подтверждения для других районов и отличающихся гидролого-акустических условий.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в статье показано, что результаты двух разных по методическому исполнению

экспериментов демонстрируют возможность оценивать и идентифицировать лучевые приходы акустической энергии при сложных гидрологических условиях. Тот факт, что численные расчеты импульсных характеристик адекватно описывают экспериментальные результаты, позволяет сделать вывод о том, что размещение приемных элементов томографических схем вблизи дна или в грунте может существенно повысить эффективность измерений и мониторинга температурных полей в шельфовых зонах. Важным результатом проделанной работы является также успешная апробация в натуральных условиях технических средств излучения, приема и обработки сигнальной информации, а также вычислительной программы на основе лучевых приближений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В. Акустическая томография динамических процессов в шельфовой зоне моря с использованием сложных сигналов // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 1. С. 5–11.
2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Войтенко Е.А., Каменев С.И., Леонтьев А.П., Моргунов Ю.Н. Акустические дистанционные измерения течений на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2004. Т. 50, № 5. С. 581–584.
3. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Е.А. Войтенко Е.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Стробыкин Д.С. Термометрия шельфовых зон океана акустическими методами // ДАН. 2006. Т. 409, № 4. С. 543–546.
4. Азаров А.А., Голов А.А., Лебедев М.С., Моргунов Ю.Н. Методы акустической томографии в задачах подводной навигации // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2 (8). С. 44–49.
5. Гидроакустический комплекс для дистанционного мониторинга гидрофизических параметров в мелководных акваториях. Патент 115929 Российская Федерация / В.В. Безответных, Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, А.А. Тагильцев. № 2012100170/28; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.05.2012.
6. Akulich V.A., Bezotvetnykh V. V., Burenin A. V., Voytenko E.A., Kamenev S. I., Morgunov Y. N., Polovinka Y.A., Strobyskin D.S. Remote Acoustic Sensing Methods for Studies in Oceanology // Ocean Science Journal. 2006. Vol. 41, No 2. P. 105–111.
7. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Оценка эффективности 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.
8. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2 (8). С. 44–49.
9. 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.
10. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Особенности применения акустических псевдослучайных сигналов для измерения импульсных откликов на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58, №1. С. 141–144.
11. Acoustic Toolbox. Underwater Acoustic Propagation Modeling Software. URL: www.hlsresearch.com/oalib/Modes/AcousticsToolbox/
12. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л. Об аномалиях возбуждения и распространения низкочастотных акустических волн в мелководных акваториях // Акустика океана: сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М., 1998. С. 218–222.