

УДК 534.2:556.04:556.08

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ В ЗАЛИВАХ, БУХТАХ И МОРСКИХ ГАВАНЯХ

Ю.Н. Моргунов, В.В. Безответных,
Е.А. Войтенко, М.С. Лебедев

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

Метод встречного зондирования с использованием 3-точечной схемы постановки акустических трансиверов вблизи м. Шульца (залив Посьета, Японское море) позволил в течение октября 2012 – августа 2013 провести измерения интегральных значений скорости течения и температуры. Для решения обратной задачи используются средние значения времен распространения, которые пересчитываются в значения скорости звука по эмпирической формуле и разности времен распространения во встречных направлениях для расчета скорости течения. Средние значения скорости течения во всем водном слое для одной из трасс, полученные с 17 по 19 октября 2012, варьируются в диапазоне от -10 до 8 см/с. Для придонного слоя характерны временные вариации с периодом от 20 до 60 минут, что может быть вызвано полем внутренних волн, формирующимся за счет приливного течения (от -10 до 0 см/с). Измерения проводятся в режиме реального времени с помощью разработанного аппаратно-программного гидроакустического комплекса. В качестве зондирующих сигналов применяются сложные фазоманипулированные сигналы на основе M-последовательностей. Данный эксперимент предполагает, что выбранная методика является перспективным средством долгосрочного мониторинга интегральных значений скорости течений и температур при наличии сложных гидродинамических процессов в условиях сезонной изменчивости.

ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение мелководных акваторий для размещения фермерских хозяйств марикультуры, портовых и нефтедобывающих сооружений и т.п. требует организации долгосрочного мониторинга динамики и структуры вод. Основным недостатком применяемых контактных океанологических приборов (кроме высокой стоимости) является тот факт, что для охвата больших акваторий со сложной динамикой вод требуется их большое количество для получения объективной картины на всей площади морской акватории. Анализ работ отечественных и зарубежных специалистов в области прикладной гидроакустики показывает, что подобные исследования и измерения в мел-

ководных акваториях могут быть осуществлены акустическими методами и средствами. За основу таких разработок могут быть предложены акустические трансиверы, которые представляют совмещенные источники и приемники звуковых сигналов. Их применение в измерительных комплексах позволяет решить задачу измерения интегральных скоростей морских течений и температур на акустических трассах, пересекающих диагностируемую акваторию [1–3]. В основу метода встречного зондирования положен принцип взаимности, который заключается в том, что сигналы, распространяющиеся во встречных направлениях, имеют одинаковую лучевую структуру, но сдвинуты по времени пропорционально компоненте скорости потока воды на акустиче-

ской трассе между трансиверами. Для реализации метода необходимо организовать встречное излучение импульсных сигналов между парами трансиверов. Это позволит измерять скорость звука (температуру) и скорость течения в тех слоях, в которых удастся выделить и идентифицировать пришедшие импульсы. При встречном зондировании измеряются времена прихода n-й группы лучей t_n^- и t_n^+ , соответствующие распространению акустических сигналов против потока и вдоль него. Далее находятся сумма времен приходов $S_n = t_n^+ + t_n^-$ и их разность $\Delta t_n = t_n^- - t_n^+$ и окончательно определяются компоненты скорости течения $V_n = \Delta t_n \cdot c_n^2 / 2r$ в направлении трассы длиной r , связанные с n-й группой лучей и

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

скоростью распространения этой группы $c_n = 2g / S_n$. Для акваторий с размерами в несколько километров могут быть использованы сложные фазоманипулированные сигналы типа М-последовательностей в диапазоне частот 2000–6000 Гц. Применение таких сигналов позволяет получить импульсные характеристики волноводов на акустических трассах и реализовать указанный выше метод. Кроме этого, по полученным данным дополнительно предоставляется возможность исследовать и наблюдать параметры приливных колебаний поверхности моря и внутренних волн [4]. Важнейшей задачей при этом является обеспечение поступления измеренных данных пользователям в реальном масштабе времени.

Для реализации описанного метода в ТОИ ДВО РАН был разработан измерительный комплекс. В статье представлено описание функциональных и технических характеристик комплекса, полученных в натуральных условиях при длительной эксплуатации в заливе Посьета Японского моря. Кроме того, данный комплекс был апробирован в мелководной (менее 10 метров) акватории в Корейском проливе при выполнении контрактных работ. Несмотря на существенные различия в рельефе дна и в гидрологической обстановке комплекс надежно функционировал в течение месяца и был успешно сдан заказчику.

■ Схема и средства измерений

Все необходимые приборы для реализации метода в виде макетов разработаны, апробированы и в октябре 2012 года установлены в заливе Посьета Японского моря для осуществления долговременных измерений (рис. 1).

Акустические преобразователи трансиверов № 1, 2 и 3, пред-

ставляющие собой пьезокерамические кольца в корпусе, установлены в одном метре от дна на глубинах 40 м, 33 м и 10 м соответственно, соединены кабелем с береговыми устройствами питания, синхронизации, формирования, генерации, приема и обработки сигналов. Расстояние между преобразователями 1 и 2 составляет 2190 м, а между 2 и 3 – 1930 м. В конструкцию трансивера 2 был включен датчик для измерения придонной температуры.

Генерация сигналов и корреляционная обработка выполнена на основе плат FPGA Starter Board фирмы «Altera». Один раз в минуту трансиверы излучают и принимают фазоманипулированные сигналы типа М-последовательностей с центральной частотой 6 кГц. Длительность сигнальной посылки составляет 255 символов при 4 периодах несущей частоты

на символ. Сигнальная информация с трансиверов передается в блок корреляционной обработки. Подробное описание устройства коррелятора и генератора М-последовательности приведено в работах [5–7]. На рис. 2 приведена общая блок-схема комплекса.

Синхронизация всех трансиверов и блока корреляционной обработки осуществляется от системы GPS с точностью $\pm 10^{-6}$ с, при условии наличия 4 и более видимых спутников, а при их отсутствии – от внутреннего термостатированного кварцевого генератора ГК103-ТС-М с относительной нестабильностью 10^{-8} . Для обеспечения возможности работы пьезокерамических преобразователей в обратимом режиме применены диодные коммутаторы, реализованные по стандартной схеме, применяемой в судовых эхолотах.



Рис. 1. Карта района работ и схема эксперимента

Для реализации мониторинга динамики морской среды в реальном масштабе времени по вышеописанной методике был разработан программный интерфейс CurM (рис. 3) с возможностью его

адаптации к используемым техническим средствам исследования. Блок корреляционной обработки и пиковые детекторы в составе аппаратной части комплекса предназначены для вычисления импульсной

характеристики морской среды и поиска её максимумов, соответственно с последующей передачей этих данных (значений времен распространения и амплитуд приходов акустической энергии) по COM-порту (интерфейс RS-232) на персональный компьютер в качестве входных параметров программы. Интерфейс реализован на языке программирования среды MATLAB, управление и прием данных с блока корреляционной обработки производится с помощью интегрированных в данную среду объектов Timer и Serial.

Первый объект осуществляет временной контроль работы COM-порта компьютера, второй – непосредственно чтение данных. Все поступающие данные сначала накапливаются во входном буфере объекта Serial, после того как поток данных прекращается, происходит закрытие COM-порта и данные передаются в рабочую область среды MATLAB для последующей обработки и вычисления выходных параметров. Измерения проводятся с периодом 1 раз в минуту. При этом доступен контроль входных параметров, таких как значения максимальной глубины и солёности, необходимых для перерасчета скорости звука в температуру по эмпирической формуле, горизонтальной дистанции между трансиверами, используемой при расчетах значений скорости течения, а также времени работы таймера (длительность эксперимента). В программе предусмотрено сохранение всех принимаемых и рассчитываемых значений для их постобработки и анализа. В качестве временных меток также сохраняются текущие значения времени и номер посылки (измерения). Визуализация предусматривает отображение входных и выходных параметров эксперимента. На рис. 4 представлена реализация программы в

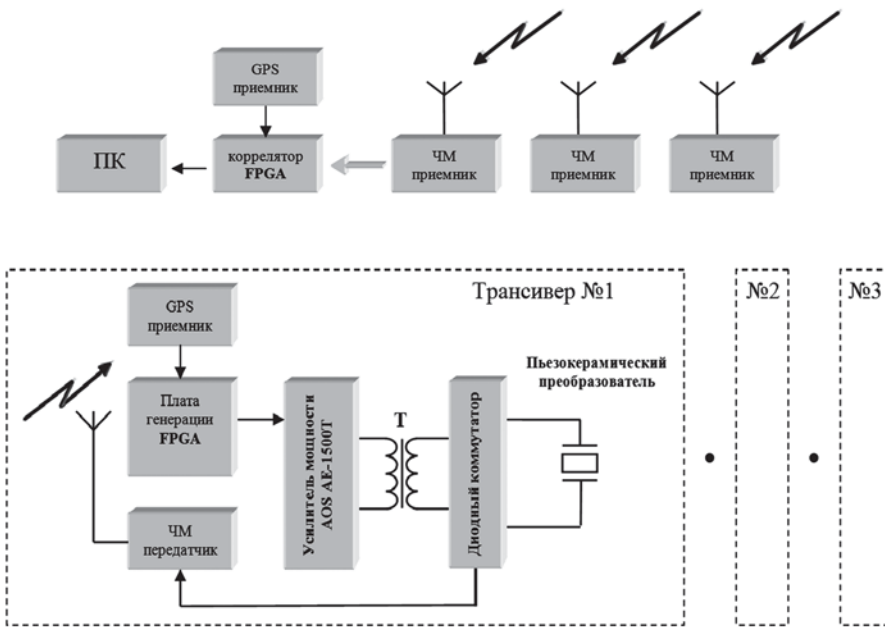


Рис. 2. Блок-схема акустико-гидрофизического комплекса

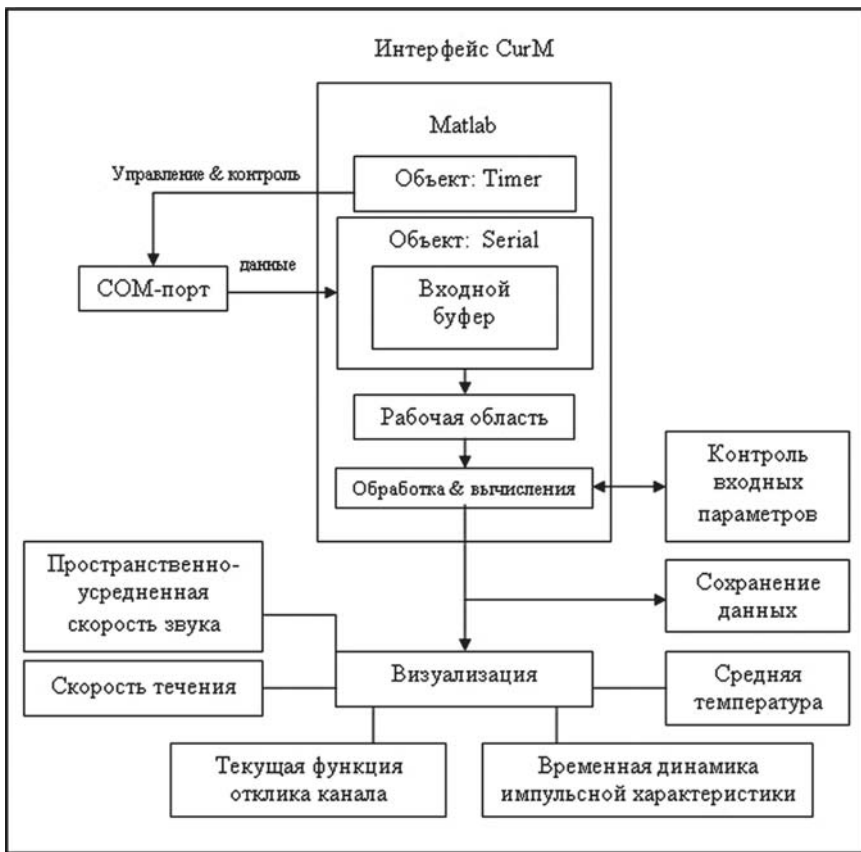


Рис. 3. Блок-схема программного интерфейса CurM

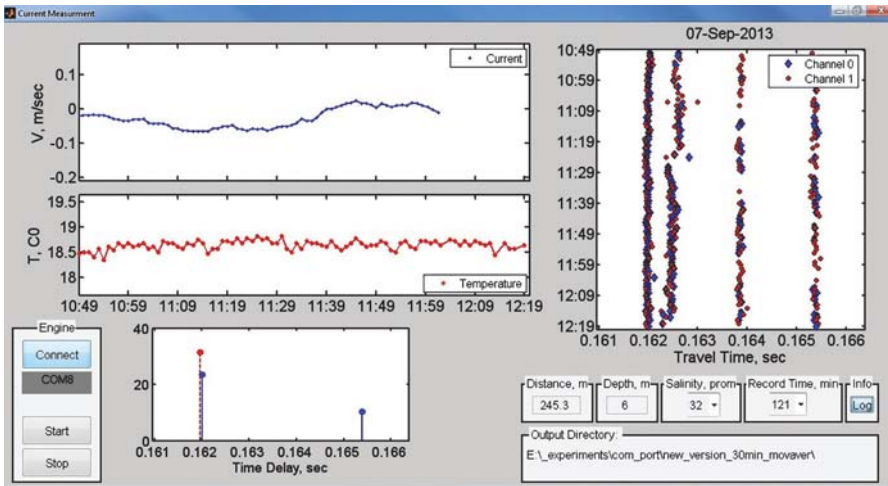


Рис. 4. Графическое окно программного интерфейса CurM

виде графического окна. На крайнем справа графике отображается динамика импульсных характеристик во времени при зондировании в противоположных направлениях. Кроме этого возможности интерфейса позволяют на данном графике выделять с помощью окна слежения необходимые приходы акустической энергии, по которым должны осуществляться расчеты выходных параметров. Верхний левый график отображает ход усредненного по 30 минутам значения скорости течения, вычисляемого по выбранным приходам с учетом горизонтальной дистанции, наиболее близкой к длине лучевых траекторий, формирующих данные приходы. Центральный левый график отображает текущие значения средней температуры на трассе, нижний – текущие значения амплитудно-временной структуры импульсных характеристик. В качестве примера, для ознакомления с интерфейсом, на рис. 4 отображаются результаты измерений, проводившихся в феврале 2013 г. Гидрологическая обстановка характеризовалась изотермией от поверхности до дна и поэтому в данном случае расчет выходных параметров (температуры и скорости течения) мог осуществляться по первому приходу.

■ Экспериментальные результаты

Апробация разработанных аппаратно-программных средств проводилась с 17 октября 2012 г. в виде тестовых суточных измерений. На рис. 5 приведены нормированные импульсные характеристики волновода, полученные на акустической трассе 1–2 в противоположных направлениях после корреляционной обработки.

Из анализа рисунка можно заключить, что импульсные характеристики схожи, т.е. закон взаимности соблюдается. Следует отметить, что аналогичная ситуация характерна и для трассы 2–3. В октябре условия морской среды

характеризуются сложной гидрологической обстановкой из-за периодического захода холодных вод из глубокого моря на шельф и в бухту Витязь. При этом формируется придонный холодный слой, который способствует фокусировке акустической энергии в этом слое, т.к. источники звука размещены у дна. Это мы и наблюдаем при рассмотрении импульсных характеристик. С 20:20 до 02:20 и с 12:20 до 16:20 часов фиксируются максимальные по амплитуде, поздние, т.е. распространяющиеся с минимальной скоростью, приходы. По измеренным временам распространения этих приходов акустической энергии рассчитывалась скорость звука в придонном слое. Далее производился пересчет скоростей звука в температуру (рис. 6) по алгоритму, «зашитому» в программной части комплекса и использующему формулу Макензи [8]. Для сравнения также приведён график изменения температуры, полученный с донного датчика. Можно отметить четко фиксируемые заходы холодной воды при прохождении приливного фронта. Как видно из приведённых графиков, данные по температуре, полученные разными методами, в целом совпадают и фиксируют перепады темпера-

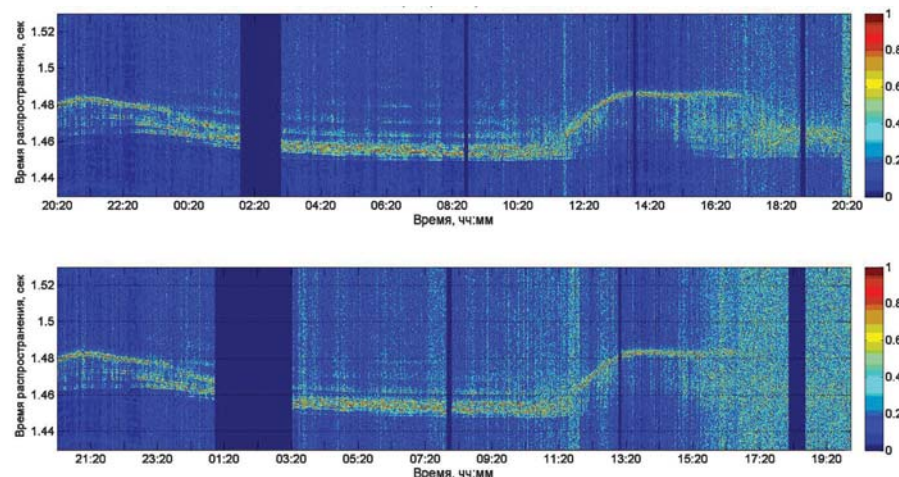


Рис. 5. Функции отклика гидроакустического канала в противоположных направлениях

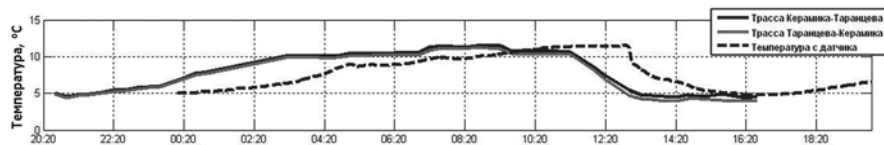


Рис. 6. Измеренные (датчик температуры – пунктир) и рассчитанные значения температуры на трассе 1–2

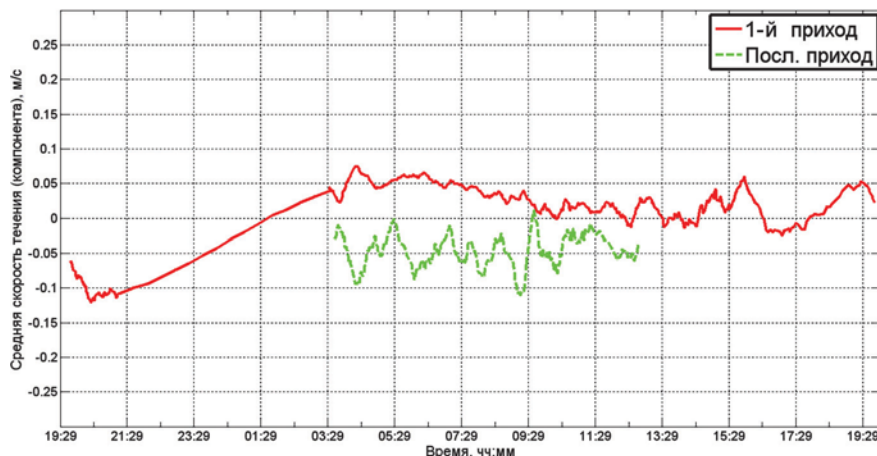


Рис. 7. Рассчитанные значения компоненты скорости течения для различных приходов акустической энергии

туры приблизительно в 5°C . Есть отличия в фазе температурных изменений, т.к. акустическими методами измеряется интегральная по трассе температура, а датчик даёт контактные измерения в точке постановки.

Расчет скорости течений мы планировали провести по измеренным временам распространения первого и последнего прихода, т.к. они характеризуют динамику течений во всем слое и придонном соответственно. По техническим причинам в моменты прилива нам не удалось провести расчеты с использованием последнего прихода, что может быть связано с особенностями формирования импульсных характеристик в данном частотном диапазоне и несовершенством алгоритма расчета разности времен. На рис. 7 представлены рассчитанные значения компоненты скорости течения вдоль акустической трассы 1–2.

Анализ зависимостей показывает, что значения средней по слою скорости течения, рассчитанной по первому приходу, для всего времени эксперимента составляют от -10 см/с до 8 см/с . Т.е. для первого приливного цикла наблюдается смена знака на противоположный, отражающая изменение направления компоненты скорости течения вдоль акустической трассы. В начале эксперимента водные массы заходили в бухту, а в период отлива выходили из бухты.

Что касается скорости течения в придонном слое, рассчитанной по последнему приходу в период отлива, то ее значения находятся в диапазоне от -10 см/с до 0 см/с , т.е. в этот период значения скоростей колеблются с периодом от 20 до 60 минут, но направлены в бухту. Таким образом, можно констатировать, что в диагностическом волноводе под действием

внутреннего прилива в придонном слое формируется поле внутренних волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты демонстрируют функциональные и технические характеристики разработанного комплекса, полученные в натуральных условиях при длительной эксплуатации. Данный комплекс успешно функционировал с октября 2012 года до августа 2013 года. Были получены массивы экспериментальных данных для анализа динамики и структуры вод в заливе Посьета Японского моря. Можно отметить, что стабильность работы комплекса позволила провести долгосрочные экспериментальные исследования динамических процессов на шельфе залива Посьета с учетом сезонной изменчивости и сложных условий прибрежной зоны. Особо следует подчеркнуть, что применение разработанных технических и программных средств обработки и визуализации в режиме реального времени повышает оперативность сбора и анализа параметров морской среды для ряда перспективных задач прикладной гидроакустики. Например, комплекс может использоваться при обеспечении функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов и роботов для повышения их эффективности, т.к. знание и учет изменяющихся гидрологических условий позволит корректировать данные расчетов гидроакустической навигационной системы.

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

