

УДК 534.26

МЕТОД И ПРОГРАММА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ю.А. Половинка, А.А. Азаров,
М.С. Лебедев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН¹

Рассмотрен метод мониторинга во времени вертикального профиля скорости звука, температуры, а также уровня поверхности в мелководных акваториях и описана программа для его реализации. Метод включает в себя синхронизированные во времени излучение, прием и измерение времени распространения импульсных акустических сигналов с помощью стационарно размещенных в акватории гидроакустических излучателя и приемника звука. Расчет параметров среды производится с использованием результатов численного моделирования (в рамках лучевого приближения) распространения звука для условий эксперимента. Программа, с помощью которой реализуется метод, позволяет проводить расчеты параметров среды по измеряемым временам распространения акустических импульсов, длительно во времени и с высокой частотой. Метод разработан на основе данных экспериментальных измерений функций отклика акустических каналов на шельфе и в различных мелководных акваториях Японского моря в 2005–2011 годах. Тестирование метода и программы в натуральных условиях проведено в бухте Витязь летом и осенью 2011 года.

■ Акустическая томография в условиях глубокого океана

В рамках классической схемы акустической томографии океана Манка–Вунша [1] за последнюю четверть века разработан и экспериментально апробирован ряд методик расчета и мониторинга во времени полей скорости звука и температуры водной среды в условиях глубокого океана. Для восстановления параметров водной среды использовались результаты измерений времен распространения импульсных сигналов вдоль акустических трасс на дистанциях от сотен до двадцати тысяч километров в Тихом, Северном Ледовитом, Атлантическом, Индийском океанах и в Средиземном море. В последние десять лет эксперименты проводились в сроки от нескольких

месяцев до четырех лет, с целью оценки межгодовой, сезонной и внутрисезонной изменчивости температуры (теплосодержания) в исследуемых акваториях [2]. При расчете вариаций температуры в рамках используемых методик [2] предполагается, что времена распространения τ_i акустических импульсов вдоль траекторий собственных лучей $r_i = r_i(x, y)$ в водной среде равны:

$$\tau_i = \frac{r_i}{C(r_i)}, \quad (1)$$

где $C(r_i)$ – скорость звука вдоль траекторий собственных лучей. Вариации времен прихода акустических импульсов $\Delta\tau_i$ связаны с возмущениями скорости звука ΔC_i вдоль траекторий r_i в соответствии с выражением (2):

$$\Delta\tau_i = -\frac{\Delta C_i}{C(r_i)^2} r_i, \quad (2)$$

Температура T_i вдоль траектории распространения акустического импульса является функцией от соответствующего распределения скорости звука $C(r_i)$ и может быть записана в виде (3) и рассчитана по известным уравнениям, например [3]:

$$T_i = f(C(r_i)). \quad (3)$$

В представлении (3) для задач глобальной термометрии океана обычно учитывается то, что вклад солености при расчете значений скорости звука составляет порядка 5–7% от вклада температуры, и функциональная зависимость от данного параметра в (3) исключается.

Основным результатом экспериментальных исследований [2] является вывод о том, что времена распространения аку-

¹690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43; e-mail: yrivlad@poi.dvo.ru

стических импульсов на длинных трассах, по существу, пространственно интегрируют и подавляют мезомасштабную изменчивость и позволяют производить точные измерения средних по траекториям лучей значений температуры. Так, усредненные за сутки времена распространения акустических импульсов на 4-дневных интервалах измерений демонстрировали превосходную разрешающую способность вариаций параметров теплового поля на дистанциях более 1000 км. Рассчитанная по данным акустических измерений межгодовая, сезонная и изменчивость температуры более коротких периодов проявляется в виде существенных изменений только на интервалах в несколько недель. Линейные тренды температуры, полученные за десять лет, малы по сравнению с межгодовой изменчивостью и различаются для различных траекторий, часть из которых демонстрирует нагревание, часть – охлаждение среды в областях расположения конкретных акустических трасс (рис. 1, 2).

Принципиальными моментами акустической термометрии в глубоком океане являются: выбор частотного диапазона акустических сигналов и адек-

ватное условиям эксперимента численное моделирование распространения этих сигналов. Интерпретация данных результатов акустических измерений температуры производится совместно с аналогичными, измеренными или рассчитанными, результатами температурных вариаций в среде. Выбор частоты излучаемых акустических сигналов в диапазоне 20–250 Гц определяется требуемой дальностью распространения и механизмами затухания вдоль траекторий распространения. Адекватное условиям эксперимента численное моделирование распространения акустических сигналов возможно при максимально точном задании гидрофизических условий вдоль трасс распространения.

Интерпретация и сравнение результатов измерений и расчетов вариаций температуры различными методами также являются отдельными сложными и актуальными, особенно в свете развития новых методик измерений, задачами. В цитируемой работе [2] акустические измерения проводились с помощью импульсных сигналов со средней частотой 75 Гц. Численное моделирование выполнялось на основании данных из World Ocean Atlas 2005 (WOA05). Из-

меренные времена распространения импульсных сигналов сравнивались с соответствующими временами распространения акустических сигналов, полученными по расчетам для четырех независимых оценок гидрофизических параметров среды для северной части Тихого океана: 1 – климатологической, в соответствии с WOA05; 2 – по данным измерений приповерхностного поля температуры, полученных на основании спутниковой альтиметрии и контактных измерений профиля; 3 – из анализа циркуляции в рамках проекта Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (Jet Propulsion Laboratory, JPL-ECCO), 4 – по моделированию структуры приходов с высоким разрешением на основании модели Parallel Ocean Program (POP). Данные акустических измерений показали, что WOA05 дает лучшую оценку гидрологии для средних значений времен прихода, чем JPL-ECCO и оценки POP, данные гидрологии которых не по-

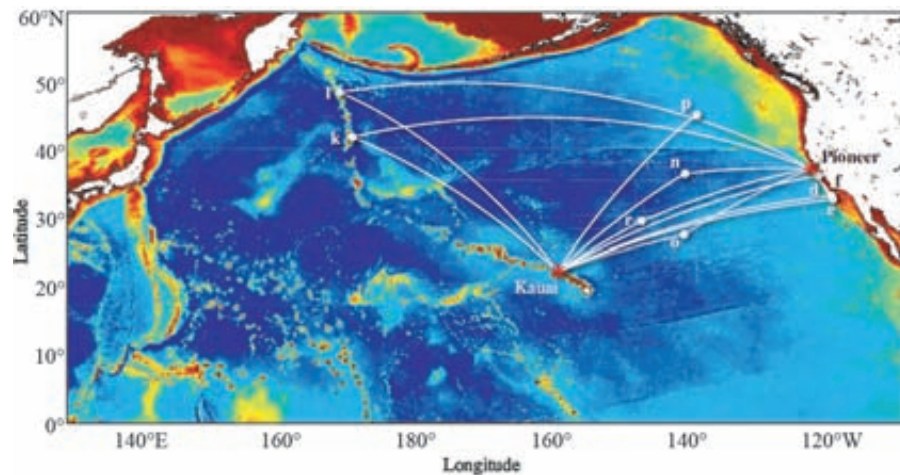


Рис. 1. Схема акустических измерений температуры в северной части Тихого Океана [2]

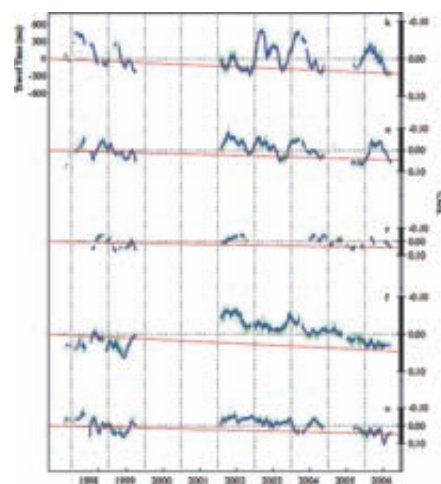


Рис. 2. Вариации времен распространения импульсных акустических сигналов (ось слева) и соответствующие им значения температуры (оси справа) для трасс, представленных на рис. 1 (зеленая линия – осредненные за сутки значения, синяя линия – осредненные за 12 суток значения, красная линия – линейный тренд, связанный с потеплением) [2]

зволили получить соответствие с акустическими результатами. Совпадение структур временных приходов (от 6 до 9 импульсов в эксперименте и такое же количество групп собственных лучей при моделировании) отражает соответствие проведенных измерений и крупномасштабной температурной изменчивости в используемых моделях. Имеющиеся отличия указывают на то, что акустические данные термометрии могут отражать наличие дополнительных связей, которые не учитываются в рамках численного моделирования для конкретных моделей океана.

■ Акустическая томография мелкого моря

Возможность использования томографической схемы Манка–Вунша [1] с целью определения вертикального профиля скорости звука для случая мелкого моря рассмотрена в работе О. Родригеса и С. Йесуса [4]. Расчет профиля скорости звука по известным временам распространения акустических импульсов между излучателем и гидрофоном проводится в результате решения системы линейных уравнений, отражающих связь флуктуаций времен прихода импульсов по лучам с локальными флуктуациями скорости звука. Основным выводом работы [4] является то, что в отличие от случая глубокого моря, где число разрешенных приходов (собственных лучей) равно количеству независимых приходов (по числу уравнений в системе), в мелком море количество независимых приходов может быть намного меньше, чем количество разрешенных приходов. Это означает, что в мелком море существуют физические ограничения на количество независимых при-

ходов звуковой волны. Независимость приходов наиболее трудно определить, поскольку она тесно связана с характеристиками каналов распространения звука.

Методика [4] базируется на фундаментальном допущении, что для малых возмущений профиля скорости звука $\delta c(z) = c(z) - c_0(z) \ll c_0(z)$ возмущение времени распространения, $\Delta \tau_j$, акустического импульса может быть записано в виде

$$\Delta \tau_j = \tau_j - \tau_j^0 = \int_{\Gamma_j} \frac{ds}{c(z)} - \int_{\Gamma_j} \frac{ds}{c_0(z)} \approx \approx - \int_{\Gamma_j} \frac{\delta c(z)}{c_0^2(z)} ds, \quad (4)$$

где интеграл берется вдоль невозмущенных собственных лучей Γ_j . Для набора из \mathcal{R} возмущений времен распространения и при дискретизации вертикального профиля скорости звука в воде на L слоев можно связать вектор задержек $\Delta \tau$ с вектором возмущений профиля скорости звука δc , используя линейную систему уравнений:

$$\Delta \tau = E \delta c + n, \quad (5)$$

где $\Delta \tau = [\Delta \tau_1, \Delta \tau_2, \dots, \Delta \tau_T]^t$, $\delta c = [\delta c_1, \delta c_2, \dots, \delta c_L]^t$ и каждый член δc_l связан со средним значением $\delta c(z)$ в каждом l -м слое; $[\dots]^t$ – обозначает операцию транспонирования вектора $[\dots]$. В уравнении (5) n является случайной ошибкой и отражает статистические свойства шума от различных источников. Если наблюдения являются абсолютно детерминированными (что справедливо при численном моделировании), то $n = 0$. Матрица E размерностью $T \times L$ называется матрицей ядра преобразования, «kernel matrix», и ее строки имеют следующую структуру:

$$e_i = \left[\frac{\Delta s_{i1}}{c_{01}^2} \frac{\Delta s_{i2}}{c_{02}^2} \dots \frac{\Delta s_{iL}}{c_{0L}^2} \right]. \quad (6)$$

Здесь Ds_{ij} – длина i -го луча внутри j -го слоя, $i = 1, 2, \dots, T$ и $j = 1, 2, \dots, L$. Принципиальным моментом работы [3] является обоснование того, что если в глубоком море количество разрешенных приходов (собственных лучей) равно числу независимых приходов (с точки зрения системы линейных уравнений (5)), то в мелком море количество независимых приходов намного меньше, чем количество разрешенных приходов (собственных лучей). Выбор количества слоев L можно сделать множеством различных способов. Обычно L делается по возможности большим и практически зачастую он больше \mathcal{R} . В этом случае система уравнений (5) имеет больше неизвестных, чем уравнений, и поэтому имеет бесконечное число решений. Формально столбцы матрицы E образуют зависимое множество. В плане основной проблемы – связи вариаций времен распространения и изменений скорости звука – неполный ранг означает, что не все разрешенные приходы переносят независимую информацию о скорости звука. Такая система уравнений имеет решение, однако это решение не является единственным. Для нахождения решения переопределенной системы уравнений в [4] предлагается использовать метод псевдоинверсии (SVD), позволяющий найти решение переопределенной системы линейных уравнений с минимальным значением нормы этой системы. В случае, когда число уравнений равно числу неизвестных ($i=j$), численное решение может быть найдено достаточно просто в рамках используемого стандартного программного обеспечения.

В работе [5] описаны методика измерений и схема эксперимента в рамках програм-

мы MREA'03 с целью быстрого дистанционного сбора гидрофизических данных в морских условиях. Эксперименты проводились с помощью технической системы акустических томографических измерений, включающей подводный акустический излучатель, буксируемый кораблем, и свободно дрейфующий акустический океанографический радиобуй. Данные с буя передавались в реальном масштабе времени и обрабатывались с помощью аппаратно-программного комплекса для акустических измерений и расчетов параметров среды, размещенного на корабле. Определение расстояний между излучателем и приемником производилось с помощью системы GPS. В качестве зондирующих среду сигналов использовались импульсные сигналы с линейной частотной модуляцией. Расчет параметров среды проводился на основе метода решения обратной задачи акустической томографии [4], модифицированной для случая свободно дрейфующих приемных гидрофонов [6]. На рис. 3 приведен пример расчета вертикального профиля температуры по результатам акустических измерений времени распространения импульсных сигналов для случая мелкого моря [6].

Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность быстрой оценки параметров водной среды и, в

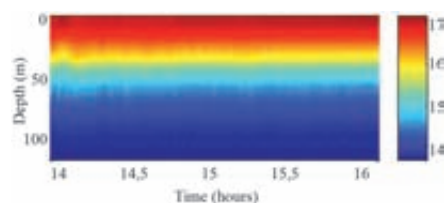


Рис. 3. Вариации во времени вертикального профиля температуры для случая горизонтально однородной водной среды по измеренным временам распространения импульсных ЛЧМ сигналов [6]

общем случае, дна в натуральных условиях. В то же время для данной схемы измерений и ее технической реализации имеется принципиальная проблема точности позиционирования по GPS акустических излучателей и приемников звука и вследствие этого невысокая точность определения параметров среды. Также данная система не позволяет проводить мониторинг параметров среды и процессов во времени вдоль конкретного направления или между конкретными точками в пространстве ввиду неуправляемого дрейфа приемного радиобуя. Постановка судна с излучателем и радиоокеанографического буя на якоря только частично решает задачу точного определения дистанции между источником и приемниками акустических сигналов, так как не позволяет разместить их стационарно в пространстве. Следует также отметить высокую стоимость проводимых измерений с использованием данной системы, что ограничивает круг ее применимости. В дальнейшем методика получила развитие в проектах MREA'04 и MREA/VP'07, а модифицированные технические системы прошли апробацию в проведенных в их рамках экспериментах.

В работе [7] описана методика и приведена схема технической реализации томографического восстановления вертикальных профилей скорости звука и течения в мелком море по измеренным временам прихода акустических импульсов между установленными на дне двумя ресиверами (обратимыми источником и приемником звука). Определение вертикального профиля скорости звука (ПСЗ) в данной работе выполняли по измеренным временам прихода акустических им-

пульсов, значениям опорного профиля скорости звука, близкого к значениям профиля скорости звука в районе работ, и данным о рельефе дна с использованием комбинированного расчета на основе метода согласованных временных откликов [8] и метода решения обратной задачи [1]. Для точного измерения времени распространения импульсных сигналов между стационарно установленными на дне ресиверами использовались сигналы точного времени системы GPS. Для определения вертикального профиля скорости звука ресиверы размещали таким образом, чтобы соединяющая их линия проходила через область измерения среднего вертикального профиля скорости звука. Схема измерений, используемая аппаратура и методика расчета [7,8] позволяют в условиях мелкого моря проводить идентификацию линейно-независимых групп собственных лучей, рассчитывать усредненные по ансамблю времени приходов акустических импульсов и выполнять восстановление ПСЗ с учетом профилей опорного вертикального распределения скорости звука и профиля глубин между парами измерительных станций. Методика расчета [7] также не точна, поскольку: 1) вертикальный профиль скорости звука определяется не по временам всех измеренных приходов, а только по числу, равному количеству линейно-независимых собственных лучей; 2) используются измеренные и осредненные по большому количеству импульсов значения времен приходов; 3) в качестве опорного профиля скорости звука берется некоторый средний по району измерений ПСЗ. Существенным недостатком схемы технической реализации мето-

дики [7] является то, что отсутствует возможность получать результаты измерений и управлять параметрами излучения в реальном времени, что необходимо для оперативного реагирования на возникающие изменения в исследуемой среде, что особенно актуально при длительных наблюдениях в экстремальных условиях.

■ Метод акустического мониторинга параметров среды в мелководных акваториях

Перед авторами статьи стояла задача разработки способа измерений и контроля во времени вертикального распределения скорости звука, температуры, а также вариаций уровня поверхности в мелководных акваториях. Измерения должны были проводиться в реальном масштабе времени. Требовалось обеспечить высокую абсолютную точность определяемых величин, максимальное разрешение по глубине и заданную (высокую) периодичность циклов измерений в течение длительных периодов времени наблюдений.

Поставленная задача решена авторами с помощью разработанной методики и программы для ЭВМ, реализующей методику для аппаратурных схем измерений функции отклика акустических каналов в мелководных акваториях на стационарных трассах. Схема реализации метода заключается в размещении излучателя и приемника акустических сигналов таким образом, чтобы соединяющая их линия проходила через область измерения вертикального профиля скорости звука. Определяются глубины их установки и горизонтальная дистанция между их проекциями к поверхности.

Выполняется измерение вертикального профиля скорости звука $C_0(z)$ и профиля дна вдоль акустической трассы. Проводится расчет параметров собственных лучей для схемы измерений. Определяются углы выхода лучей из излучателя – $\alpha_{out,i}$ и прихода в приемник – $\alpha_{in,i}$, количество отражений лучей от дна $N_{bot,i}$ и поверхности $N_{surf,i}$, длины траекторий $D_{r,i}$, амплитуды $A_{r,i}$ и времена распространения $t_{r,i}$ между излучателем и приемником. Затем осуществляют излучение одиночного акустического сигнала излучателем и регистрацию приемником серии импульсных сигналов, сформированных в области между источником и приемником. Измеряются времена между излученным сигналом и каждым зарегистрированным приемником импульсом. Для этого могут использоваться как сигналы точного времени, так и сигналы высокостабильных генераторов. Далее проводится идентификация зарегистрированных гидрофоном импульсов и рассчитанных численно приходов сигналов вдоль собственных лучей на основании равенства измеренных и рассчитанных времен их распространения и определяются скорости V_{ori} , $V_{ori} = \frac{D_{0,r,i}}{\tau_{0,r,i}}$ акустических импульсных сигналов между источником и приемником вдоль траекторий групп собственных лучей [9]. Значения глубин z_{oi} вертикального профиля, соответствующих скоростям V_{ori} , определяются на основании калибровки, по результатам промера вертикального профиля скорости звука $C_0(z_i)$ на момент начала измерений, из условия $C_0(z_i) \cong V_{ori}$. Для всех последующих моментов времени расчет вертикальных профилей скорости звука

$C_0(z_i, t_i)$ производят по новым измеренным значениям времен прихода серии импульсов путем расчета соответствующих им скоростей распространения V_{ri} , для определенных в начальный момент времени значений глубин z_{oi} .

В отличие от [7] в предлагаемом методе для калибровки используются экспериментально измеренные вдоль трассы значения вертикального профиля скорости звука, а не значение некоторого среднего по акватории вертикального профиля. Также для расчета каждого нового профиля скорости звука используются времена всех, а не только линейно-независимых приходов в функции отклика канала. Для каждого измерения профиля скорости звука используют одну рабочую посылку, и первичные данные измерений не усредняются. В данном подходе не требуется определения независимых собственных лучей и полного разделения приходов во времени, что составляет основные проблемы при нахождении вертикального профиля скорости звука на основании метода решения обратной задачи [4, 7].

■ Программная реализация метода

В данном разделе представлено описание программы МИК [10], которая на основе численного моделирования распространения звука, идентификации собственных лучей и калибровки системы по результатам контактных измерений параметров среды позволяет реализовать метод измерения и мониторинга во времени вертикального профиля скорости звука и температуры, а также вариаций уровня моря по данным амплитудно-временных измерений функции отклика

акустического канала на стационарных трассах. В рассматриваемом подходе измерение структуры и параметров функций отклика акустических каналов является самостоятельной технической задачей, которая может быть решена различными способами [5, 7, 11]. Методика и отдельные расчетные блоки программы МИК разрабатывались на основе данных измерений функций отклика акустических каналов на стационарных трассах в 2003–2010 годах на шельфе Японского моря. Апробация методики и программ в полном объеме с измерениями в режиме реального времени была проведена осенью 2011 года на полигоне ТОИ ДВО РАН в бухте Витязь. На рис. 4 приведены структура и схема взаимодействия отдельных модулей программы МИК.

Использование программы возможно как в реальном масштабе времени (измерение и мониторинг параметров среды), так и в режиме обработки полученных ранее экспериментальных результатов. Принципиальным моментом работы программы является использование для измерения параметров среды и расчетов в программе как данных измерений амплитудно-временной структуры функций отклика канала, так и данных предварительного моделирования функции отклика канала для конкретной схемы измерений. Программа МИК написана в среде языка программирования MathLab на основе GUI интерфейса и может работать как в автономном режиме, с жестко заданными параметрами, так и под управлением оператора, с возможностью управления режимами излучения и приема акустических сигналов и тонкой подстройкой параметров измерения и обработки получаемых данных.



Рис. 4. Блок-схема программы измерения и мониторинга параметров среды

На рис. 5 приведена первая рабочая панель программы МИК, в режиме которой производится ввод начальных данных и отображается процесс получения первичной информации.

После запуска программы в режиме работы первой панели производятся ввод и контроль данных измерения функции отклика акустического канала

(ФОК). Оператором осуществляются выбор временного интервала анализа ФОК и задание начальных условий (интервалов) для следящих фильтров. В первом окне отображаются: измеренная функция отклика акустического канала с амплитудно-временной структурой приходов импульсов во временной области, результаты работы следящих фильтров с

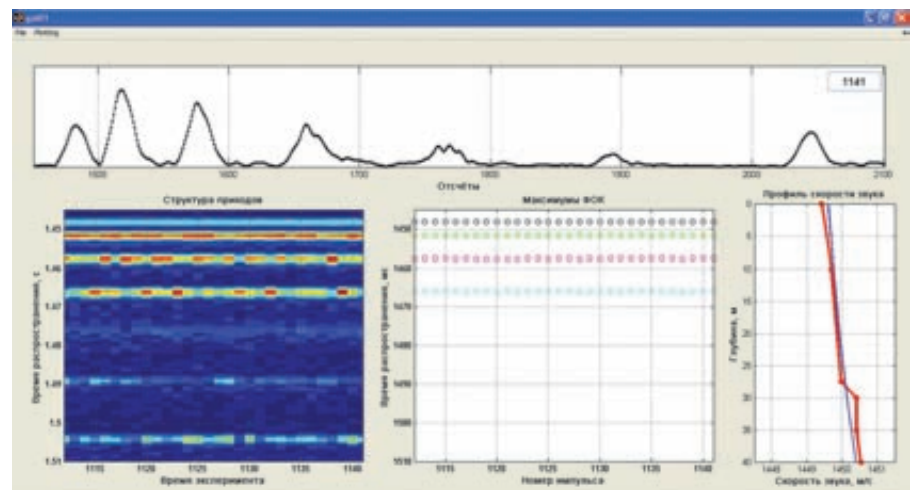


Рис. 5. Первая рабочая панель программы МИК

расчетом времен прихода выбранных импульсов. Также выводятся на экран рассчитанный профиль скорости звука, соответствующий измеренной ФОК, и измеренный (калибровочный) профиль скорости звука.

На второй рабочей панели программы (рис. 6) в зависимости от выбора отображаются динамика рассчитанных значений скорости звука или температуры для заданного количества горизонтов и значения рассчитанного уровня моря вдоль трассы акустических измерений. Все результаты отображаются в реальном масштабе времени без прореживания и осреднения.

На третьей рабочей панели программы (рис. 7) отображается информация о районе работ и параметрах акустической трассы (карта района работ, координаты, дистанция, глубины излучателя и приемника, гидрологические характеристики среды), где производятся измерения.

На данной панели также предусмотрен вывод результатов численного моделирования распространения звука для условий измерений. Численное моделирование, выделенное цветом на блок-схеме программы рис. 4, производится в рамках отдельного пакета программ [12], адаптированного под расчет требуемых в программе параметров.

В режиме четвертой (рис. 8) панели отображаются, по выбору, графики изменений во времени вертикальной структуры скорости звука или температуры по усредненным во времени значениям. На нижнем графике отображаются значения уровня моря $H(t)$, для которых также предусмотрен режим усреднения скользящим средним.

Программа МИК позволяет проводить измерения в режи-

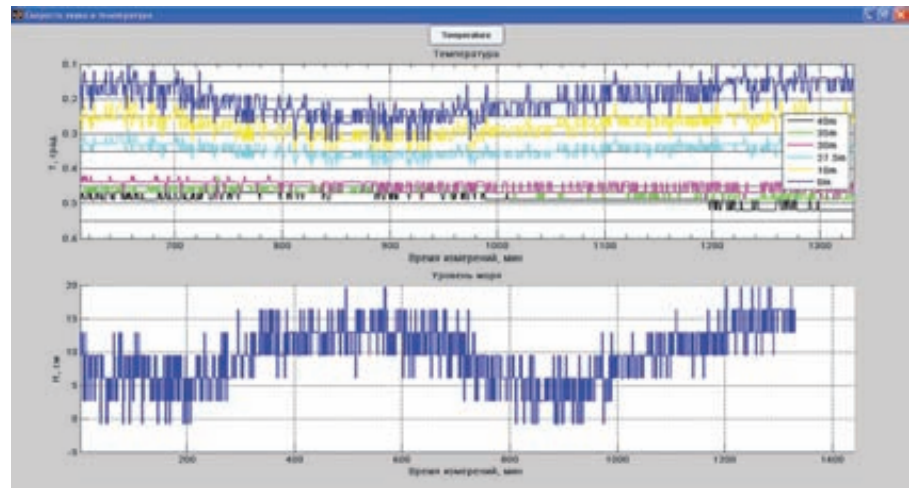


Рис. 6. Вторая рабочая панель программы МИК

ме реального времени, записывая первичную информацию и результаты расчетов параметров среды в архивные файлы. Также возможна работа программы в режиме обработки с использованием архивных файлов измеренных функций отклика акустических каналов. Еще один интересный вариант работы программы – это возможность работы в режиме удаленного доступа. Для этого необходимо обеспечить передачу информации об измеренных

ФОК в место расположения ПК с программой. Обработка данных и отображение информации будут проводиться либо в режиме реального времени, либо с небольшой задержкой на время получения первичной информации измеренных ФОК. Также данную программу можно использовать для автоматизации обработки больших объемов экспериментальных данных, полученных, например, в экспедиционных условиях.

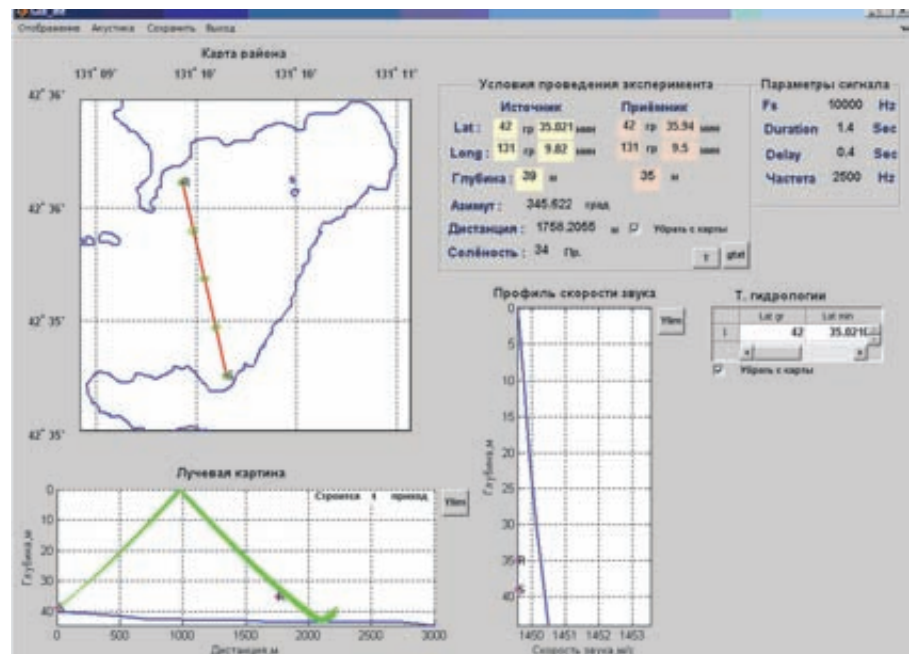


Рис. 7. Третья рабочая панель программы МИК

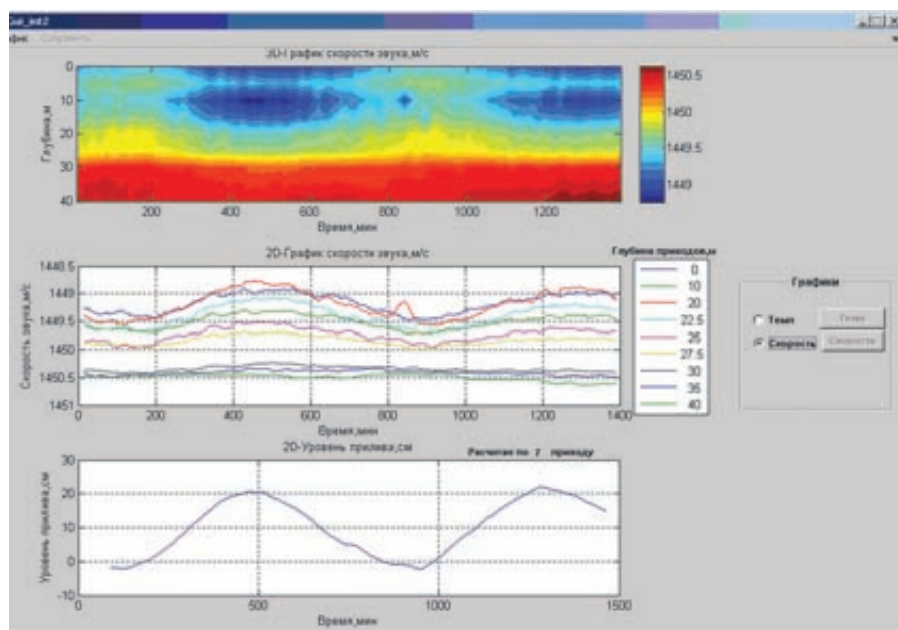


Рис. 8. Четвертая рабочая панель программы МИК

■ Аппаратурная реализация метода

Апробация метода в режиме реального времени в натуральных условиях была проведена в условиях эксперимента в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря в августе–сентябре 2011 года. Схема эксперимента приведена на рис. 9.

Излучатель акустических сигналов 1 был стационарно установлен на дне бухты, на глубине порядка 13,9 м. Излучатель соединен кабелем с формирователем сложных импульсных сигналов (фазоманипулированные на основе м-кода с длиной 255 символов, центральная частота 2000 Гц, 4 периода/символ) рас-

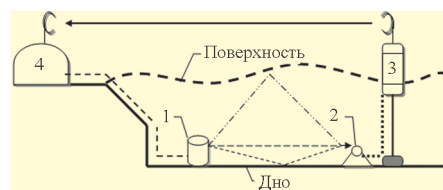


Рис. 9. Экспериментальная схема реализации метода мониторинга во времени вертикального профиля скорости звука и температуры, а также вариаций уровня моря: 1 – гидроакустический излучатель, 2 – гидрофон, 3 – радио гидрофизический буй, 4 – береговой пост управления и обработки информации

положенным на береговом посту 4. Приемный гидрофон 2 был также стационарно размещен вблизи дна (глубина $h \sim 12,5$ м) на расстоянии 808 м от излучателя 1 и через якорь соединен с автономным радиогидрофизическим буюм (РГБ) 3. Принятые гидрофоном 2 сигналы с помощью аппаратуры РГБ 3 преобразовывались в цифровой код и по радиоканалу передавались на приемник берегового поста 4. С приемника принятые сигналы вводились в компьютер, где проводилась цифровая обработка (ЦОС) принятых сигналов, которая заключалась в корреляционной свертке принятых гидрофоном сигналов с электронной маской излучаемых импульсов. По результатам ЦОС рассчитывалась функция отклика акустического канала (ФОК) во временной области. Синхронизация и идентификация во времени процесса излучения и приема проводились с помощью высокоточной системы точного времени. Полученные значения ФОК записывались в файл входных данных компьютерной программы и использовались для расчета

вертикального профиля скорости звука и осуществления мониторинга.

Отличительными признаками предложенной схемы от [5] и [7] являются наличие берегового поста, оборудование поста и РГБ приемопередающей радиосистемой, соединение гидроакустического излучателя с береговым постом, а также оборудование берегового поста автономным блоком точного времени. За счет вышеперечисленного достигаются оперативность проведения измерений и отображение результатов в режиме реального времени, надежность и независимость получения информации в периоды техногенных угроз и в экстремальных природных условиях, связанных как с водной средой, так и с состоянием атмосферы. Возможность управления параметрами излучения в реальном времени в используемой схеме позволяет расширить технические возможности измерений для широкого диапазона соотношений сигнал/шум как за счет изменений мощности излучаемых сигналов, так и за счет изменений параметров сигналов (частоты, длительности, параметров фазовой модуляции). Это необходимо, например, в условиях долгосрочных наблюдений, когда уровень окружающего шума при приеме сигналов может значительно увеличиваться за счет природных процессов (ветер, волнение, дождь, шумы биологического происхождения), техногенных шумов в акваториях (строительные, транспортные, производственные и др.). Использование дорогостоящего обеспечения в виде судов с излучателем и приемной системой [5] увеличивает материальные затраты на проведение измерений и усложняет схему обработки за счет необходимости учета изменения дистанции между источником и приемником сигналов.

В технической схеме реализации [7] изменение параметров излучения можно производить только после получения доступа к контейнеру с компьютером и анализа полученных результатов, при этом в случае, если уровень шумов за прошедший интервал наблюдений превышал уровень сигналов, получить измеряемые параметры в прототипе будет невозможно.

■ Результаты тестирования метода и программы МИК в режиме мониторинга параметров среды и постобработки экспериментальных данных

В этом разделе приведены примеры совместных контактных инструментальных и акустических измерений параметров среды в бухте Витязь, выполненные в режиме мониторинга (в реальном времени) в августе 2011 года, и результаты постобработки данных акустических экспериментов в Корейском проливе в октябре 2010 года.

На рис. 10 представлены измеренные с помощью STD-зонда и рассчитанные с помощью программы МИК в режиме акустического мониторинга вариации вертикальных профилей температуры и скорости звука в период с 27 по 28 августа 2011 года на стационарной трассе в акватории бухты Витязь. Время измерений с 16:00 до 03:00 часов.

Из сравнения зависимостей $T(z,t)$ и $C(z,t)$, представленных на верхних панелях рис. 10 (данные измерений STD зондом) и измеренных $T(z,t)$ и $C(z,t)$ акустическим методом на нижних панелях, видно, что средние абсолютные значения параметров в вертикальных профилях температуры и скорости звука, измеренные обоими способами,

и их низкочастотные тренды в основном совпадают. Различия между измеренными параметрами среды с помощью зонда STD и рассчитанными программно наблюдаются в высокочастотной части изменчивости рассматриваемых параметров. Это обусловлено принципиальными отличиями в способах гидрологических и акустических измерений. Так, графики на верхних панелях строились по натурным данным стандартной гидрологической суточной съемки вертикального распределения параметров среды, которая выполнялась зондом STD с периодичностью один раз в два часа. Для выхода в точку зондирования использовался быстроходный катер. Точка измерений находилась на середине трассы между излучателем и приемником, положение точки измерений при каждом зондировании определялось по GPS. Акустические измерения выполнялись один раз в минуту. Результаты измерений представляют собой вертикальные профили осредненных по длине стационарной трассы измеряемых параметров среды. Таким обра-

зом, представленные на верхних панелях результаты измерений $T(z,t)$ и $C(z,t)$ получены с дискретностью по времени в 120 раз меньше, чем представленные на нижних панелях результаты акустических измерений, при этом данные STD можно рассматривать как точечные измерения параметров среды, а акустические измерения представляют собой измеренные параметры среды, средние по длине акустической трассы. В результате высокой частоты измерений на графиках измеряемых акустическим методом параметров видна более тонкая структура вариаций во времени, позволяющая «видеть» динамические процессы с периодами от 2 минут и выше. Минимальный горизонтальный размер неоднородностей, параметры которых могут быть измерены акустическим методом, зависит от соотношения уровней сигнала и окружающего шума и от длины трассы измерений. Так, на графиках нижних панелей рис.10 видна структура вертикального распределения температуры и скорости звука, коррелирующая по

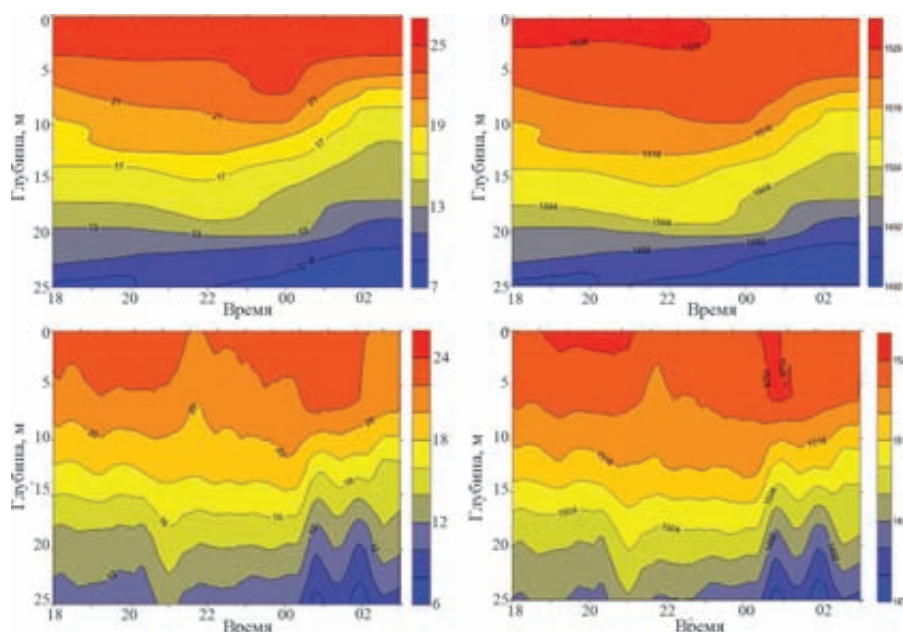


Рис. 10. Измеренные зондом STD и рассчитанные на основе разработанного метода вертикальные распределения температуры (левые панели) и скорости звука (правые панели) в бухте Витязь на интервале времени 9 часов

времени с фазами внутреннего бароклинного прилива. Характерный временной масштаб данной структуры в нашем случае 1 час, и эта структура не наблюдается в данных гидрологических наблюдений за счет низкой частоты измерений вертикального профиля температуры и скорости звука STD-зондом.

Комплексные экспериментальные акустико-гидрологические исследования распространения звука в Корейском проливе вблизи острова Норек-до были проведены в период с 15 по 16 сентября 2010 года. Акустические измерения включали в себя излучение сложных (модулируемых м-последовательностями) импульсных сигналов, а также прием сигналов стационарными приемными системами. Техническая схема измерений не отличалась от предыдущего случая. В период проведения акустического эксперимента в районе полигона выполнялись пространственно-временные измерения гидрологических параметров водной среды. Постобработка результатов измерений в части расчета динамики профилей скорости звука, температуры и уровня моря проводилась после завершения экспериментов, в лабораторных условиях. Основным отличием полученных результатов от предыдущего случая является батиграфия района работ. Длина акустической трассы составляла 592,5 м, глубины установки излучателя и приемника для минимума прилива соответственно равны 7,7 м и 2,3 м. Максимальное изменение уровня за счет прилива в районе измерений составляло 1,1 м. Таким образом, измерения проводились в условиях малых глубин и больших вариаций приливного течения и уровня моря.

На рис. 11 приведены результаты контактных измерений температуры и скорости звука

в районе измерений (верхняя панель) и результаты постобработки акустических измерений ФОК с расчетом вертикальных профилей температуры и скорости звука (нижняя панель) с 16 часов с 15 сентября до 7 часов 16 сентября 2010 года. Также как и в предыдущем случае, результаты гидрологических контактных и акустических дистанционных измерений имеют хорошее совпадение по абсолютным значениям $T(z,t)$ и $C(z,t)$. Низкочастотные вариации параметров, измеренных разными методами, хорошо коррелируют с фазами прилива. Для данного эксперимента наблюдается лучшая, по сравнению с предыдущим примером, корреляция измеряемых параметров на интервалах времени менее двух часов. Последнее обстоятельство связано с организацией гидрологических измерений, которые проводились с периодичностью один раз час и выполнялись стоящей на якоря яхты. В более высокочастотной области вариаций параметров среды (на интер-

валах времени менее часа) корректно сравнивать результаты не представляется возможным из-за низкой частоты гидрологических измерений. На рис.12 приведены графики вариаций уровня моря, построенные по данным лоции и рассчитанные по результатам акустических измерений с помощью программы МИК. Максимальная невязка между результатами уровня по лоции и расчетами по данным акустических измерений составляет до 20% в области максимального значения прилива и уменьшается до 5–7% в течение остального времени наблюдений. Отличия по фазе между графиками наблюдается только в области первого минимума прилива (рис. 12). Данный результат можно считать удовлетворительным в связи с тем, что наряду с приливом вариации уровня зависят от других параметров (ветер, течение, атмосферное давление), контроль которых, также как и инструментальные измерения уровня в области трассы, не проводились.

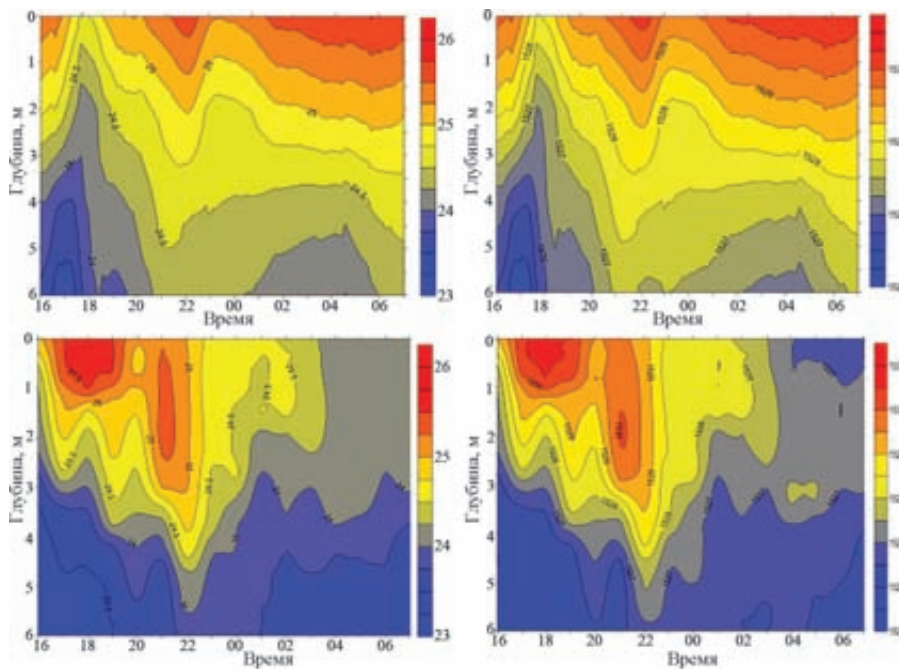


Рис. 11. Измеренные зондом STD и рассчитанные на основе разработанного метода вертикальные распределения температуры (левые панели) и скорости звука (правые панели) в Корейском проливе на интервале времени 15 часов

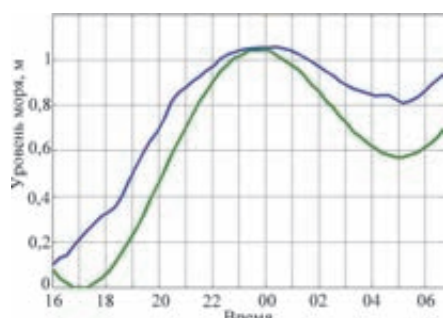


Рис. 12. Приливные изменения уровня моря по данным лоции (зеленый) и уровень моря, рассчитанный по результатам акустических измерений (синий), для района эксперимента в Корейском проливе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод и программа для его реализации позволяют проводить измерения и расчеты вертикального профиля скорости звука, температуры и уровня моря в условиях мелководных акваторий по измеренным временам распространения акустических импульсов. Техническая схема реализации метода включает в себя стационарно установленные на дне излучатель и приемник акустических сигналов. Расстояние между излучателем и приемником является базой, вдоль которой измеряются указанные параметры среды. Тестирование метода проводилось для глубин от 7 м до 45 м и дистанций между излучателем и приемником от 100 м до 3000 м. В общем случае данные ограничения по дистанции и глубине не являются принципиальными, носят технический характер и обусловлены конкретной аппаратной реализацией метода, требующей синхронизации по времени излучения, приема и обработки акустических сигналов и расчета параметров среды с помощью программы МИК. Результаты тестирования метода показали хорошее соответствие между стандартными гидрологическими и дистанционными акустическими измерениями.

Мониторинг вертикальных распределений профиля скоро-

сти звука, температуры и уровня поверхности мелководных акваторий, осуществляемый в реальном времени с высокой частотой выборок, может использоваться для оперативного контроля параметров среды в рамках задач экологического мониторинга и защиты от техногенных угроз прибрежных районов, в заливах, проливах, во внутренних морях и искусственных водоемах. В отличие от контактных измерений и дистанционных методов вертикального зондирования, с использованием расположенных на поверхности водной акватории платформ-носителей, в данном случае производится измерение средних по пространству (с линейным размером, равным расстоянию между излучателем и приемником) вертикальных профилей скорости звука и температуры методом горизонтального импульсного акустического зондирования. Значения поля скорости звука по глубине вдоль трассы определяются одновременно для всех горизонтов измерений с частотой от одного раза в секунду и более на периодах времени более года. Также имеется возможность выполнять мониторинг вертикального профиля скорости звука во времени в экстремальных условиях на тестируемых акваториях: в штормовых условиях, подо льдом, в акваториях при наличии в воде опасных веществ или ведении производственной деятельности, исключающей контактные методы измерений или невозможность использования плавучих средств. Таким образом, техническим результатом использования метода является расширение функциональных возможностей с одновременным повышением достоверности и точности при гидрологических наблюдениях за водными акваториями.

Работа частично выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки научных школ (НШ-1052.2012.5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Munk W., Worcester P., Wunsch C. *Ocean Acoustic Tomography* // Cambridge Monographs on Mechanics. New York, USA, 1995.
2. Dushaw B.D., Worcester P.F., Munk W.H., Spindel R.C., Mercer J.A., Howe B.M., Metzger K.Jr., Birdsall T.G., Andrew R.K., Dzieciuch M.A., Cornuelle B.D., Menemenlis D. A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114.
3. Mackenzie K.V. Nine-term Equation for Sound Speed in the Oceans // *J. Acoust. Soc. Am.* 1981. Vol. 70. P. 807–812.
4. Rodríguez O.C., Jesus S. Physical limitations of travel-time-based shallow water tomography // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. Vol. 6 (108).
5. Jesus S.M., Soares C., Silva A., Coelho E. Acoustic Oceanographic Buoy testing during the Maritime Rapid Environmental Assessment'2003 sea trial // *Proc. of ECUA' 2004*. P. 271–279.
6. Jesus S.M., Soares C., Onofre J., Picco P. An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. Vol. 3 (119). P. 1420–1431.
7. Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н. К локальной акустической томографии на морском шельфе // Доклады XXII сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. М., 2010. С. 225–229.
8. Гончаров В.В. Метод согласованных временных откликов в акустической томографии океана // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43, №5. С. 622–629.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011618440 «Расчет, отображение и идентификация структуры импульсного отклика акустического канала в мелком море» / Половинка Ю.А.; Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (RU). Зарегистрировано 26 октября 2011 года.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610166 «Программа для измерения и мониторинга профиля скорости звука, температуры и уровня поверхности по данным импульсного акустического зондирования в условиях мелководных акваторий» / Половинка Ю.А., Азаров А.А., Лебедев М.С.; Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (RU). Зарегистрировано 10 января 2012 года.
11. Akulichev V.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voytenko E.A., Kamenev S.I., Morgunov Yu.N., Polovinka Yu.A., Strobikin D.S. Remote Acoustic Sensing Methods for Studies in Oceanology // *Ocean Science Journal.* 2006. Vol. 41, No. 2. P. 105–111.
12. Underwater Acoustic Propagation Modeling Software – AcTUP V2.2L. URL: <http://www.emst.curtin.edu.au/products/actoolbox/index.html>