

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 534.6: 556.04: 556.08

### ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

© 2013 г. Ю. А. Половинка, А. А. Азаров, М. С. Лебедев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, лаб. 6/2

E-mail: yrivlad@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 21.03.2012 г.

Описаны методика, аппаратная реализация и программное обеспечение для дистанционного мониторинга гидрофизических параметров среды по данным импульсного гидроакустического зондирования на стационарных горизонтальных трассах в мелководных акваториях. Тестирование комплекса в части измерений вертикальных распределений профиля скорости звука, температуры, а также уровня поверхности проводилось в натуральных условиях на шельфе Японского моря и в Корейском проливе в 2011 году. Результаты измерений, получаемые в реальном времени и с высокой частотой выборок, могут быть использованы для оперативного контроля параметров среды в рамках задач экологического мониторинга и защиты от природных и техногенных угроз в области шельфа, в заливах, проливах, во внутренних морях и искусственных водоемах.

DOI: 10.7868/S0032816213010254

#### ВВЕДЕНИЕ

Активное использование ресурсов шельфа, особенно в последнее десятилетие, вызвало разработку методик и создание аппаратуры для измерений параметров водной среды и дна в мелководных акваториях оперативно, на больших территориях и с минимальными затратами. Стандартные океанографические измерения, выполняющиеся в виде полигонных гидрологических съемок и суточных станций, не могут в полной мере обеспечить указанные требования к получаемым результатам измерений ввиду их низкой разрешающей способности по времени и пространству. Также стандартные измерения не могут обеспечить непрерывный во времени мониторинг параметров среды на больших акваториях, что становится актуальным ввиду усиления влияния антропогенных факторов и техногенных угроз для условий мелководных водоемов и прибрежной зоны.

В рамках решения данной задачи в последние годы получили развитие акустические методы измерений параметров среды и характеристик динамических процессов в условиях мелкого моря [1]. При этом используются различные схемы измерений – с буксируемыми и дрейфующими источниками и приемниками гидроакустических сигналов [2], автономными донными стационарными системами [3], а также различные смешанные варианты [4].

Перед авторами статьи стояла задача разработки метода измерений и мониторинга 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.

#### МЕТОДИКА И СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Поставленная задача решается следующим образом. Излучатель и приемник акустических сигналов стационарно размещают в исследуемом районе на известной глубине таким образом, чтобы соединяющая их линия проходила через область измерения среднего вертикального профиля скорости звука. Проводится измерение време-

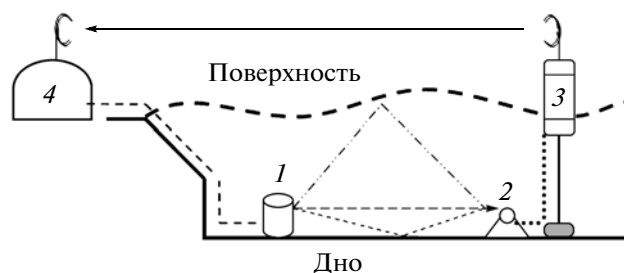


Рис. 1. Схема измерений.

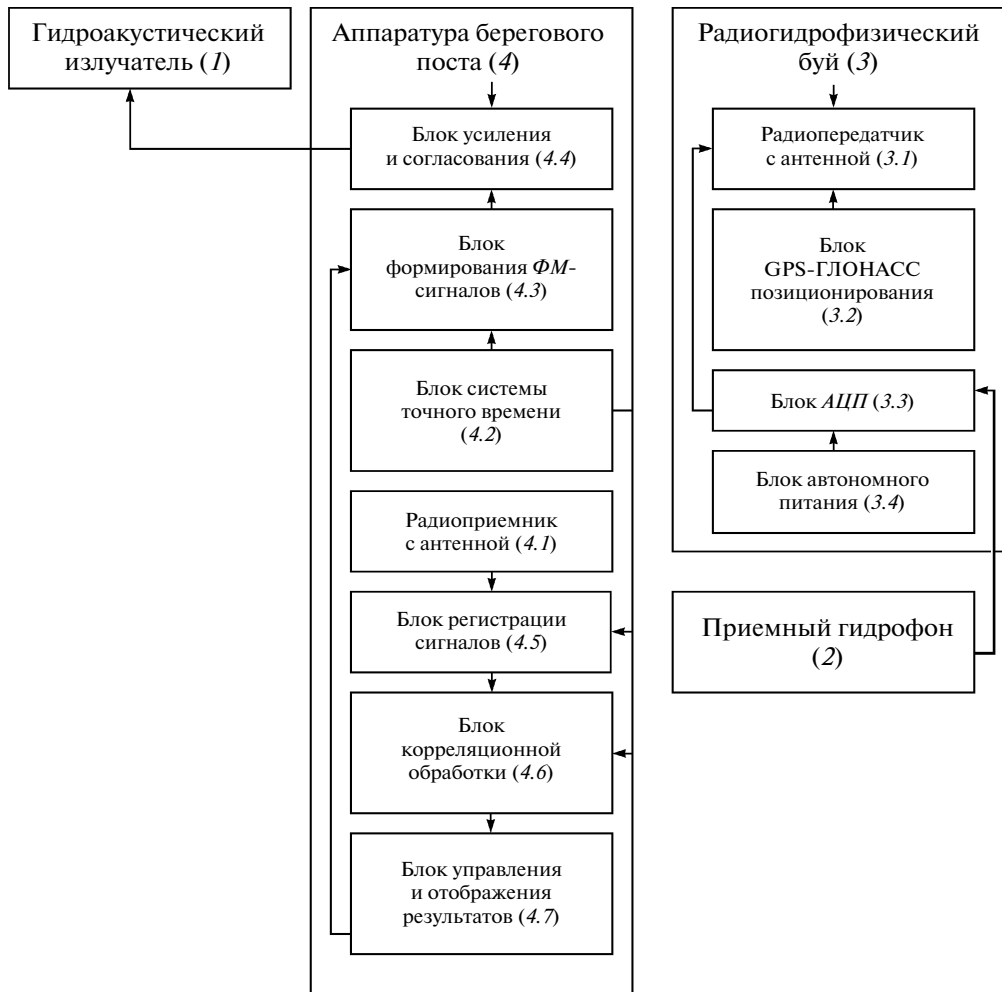


Рис. 2. Блок-схема гидроакустического комплекса.

ни распространения импульсных сигналов между излучателем и приемником с использованием системы точного времени. В начальный момент времени с помощью автономного гидрофизического зонда измеряются вертикальный профиль скорости звука, температуры и солёности –  $C_0(z)$ ,  $T_0(z)$ ,  $S_0(z)$  и профиль глубин между излучателем и приемником.

На основании полученных данных, в рамках лучевого приближения, производится моделирование и расчет параметров собственных лучей для условий схемы измерений [5]. Затем излучается одиночный акустический импульс и регистрируется серия импульсных сигналов, сформированных в области измерения. Измеряются времена между излученным сигналом и каждым зарегистрированным импульсом в серии импульсных сигналов. Из условия равенства измеренных и рассчитанных при моделировании времен прихода импульсных сигналов проводится идентификация каждого зарегистрированного импульса.

Рассчитываются скорости распространения акустических сигналов между источником и приемником вдоль траекторий групп собственных лучей  $V_{0ri}$ . Определяются глубины  $z_{0i}$  вертикального профиля для полученных скоростей, соответствующие всем измеренным и идентифицированным импульсам на основании результатов измерений вертикального профиля скорости звука из условия  $C_0(z_i) \cong V_{0ri}$ . Вертикальные профили  $C(z_i)$  скорости звука для всех последующих моментов времени (или излучаемых импульсов) определяют по вновь измеренным значениям времен прихода серии импульсов путем расчета соответствующих им скоростей распространения  $V_{ri}$  для определенных в начальный момент времени значений глубин  $z_{0i}$  из условия  $C(z_i) = V_{ri}(z_{0i})$ .

Вертикальный профиль температуры пересчитывается по формуле Макензи [6] с использованием измеренных значений скорости звука и глубины, а также измеренной солёности, которая

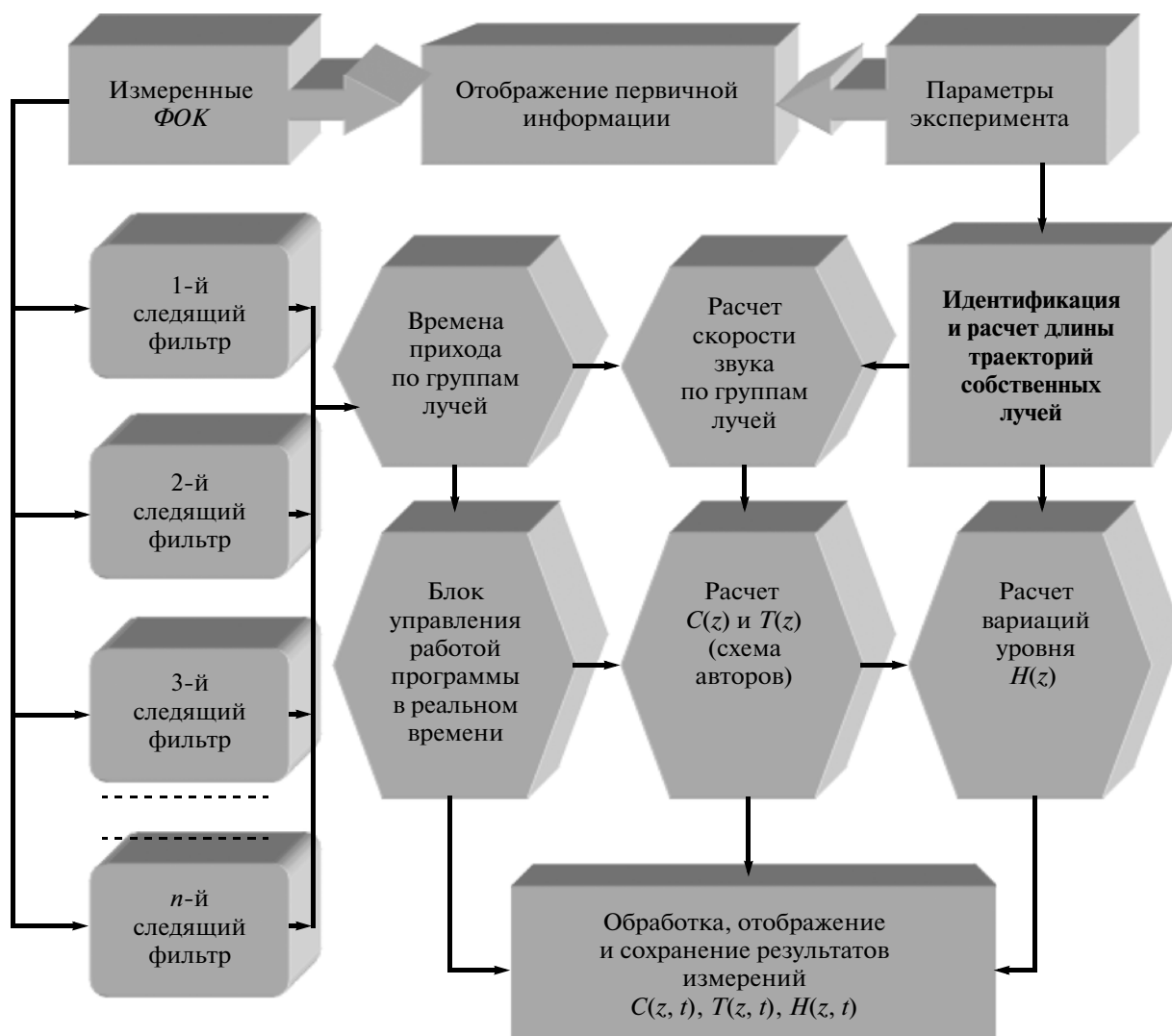


Рис. 3. Блок-схема программы измерения и мониторинга параметров среды.

считается постоянной во времени. Изменения уровня моря определяются по вариациям времен прихода импульса с максимальным количеством отражений от дна и поверхности с учетом калибровки по натурным или табличным данным уровня прилива. Как правило, используются вариации времен распространения последнего прихода в серии импульсов, регистрируемых гидрофоном.

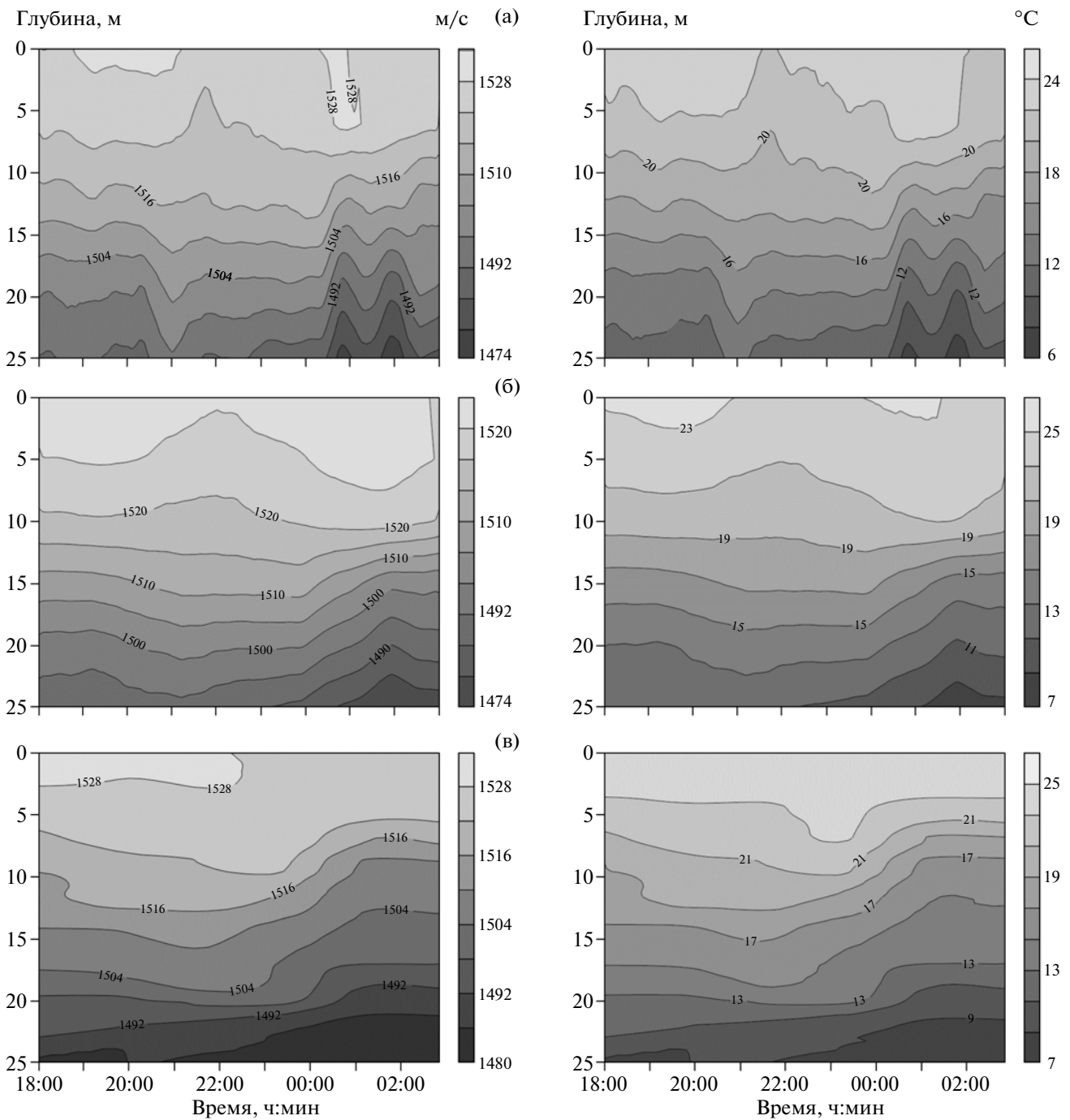
На рис. 1 приведена схема измерений, включающая стационарно установленные на дне гидроакустический излучатель 1, гидрофон 2, радиогидрофизический буй 3 и аппаратуру берегового поста 4.

### ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Измерения производятся с помощью гидроакустического комплекса [7], созданного в лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО

РАН. Блок-схема комплекса приведена на рис. 2. Работа комплекса происходит следующим образом. Фазоманипулированный ( $\Phi M$ ) импульсный сигнал, сформированный в блоке формирования (4.3), синхронизированный с сигналами точного времени блока (4.2), поступает через блок усиления и согласования (4.4) на гидроакустический излучатель (1) и излучается в измеряемую среду. Прошедший в среде акустический сигнал регистрируется приемным гидрофоном (2). Сигнал с гидрофона по сигнальному кабелю (электрическому или оптическому) поступает на блок аналого-цифрового преобразователя АЦП (3.3) радиогидрофизического буя (3).

Далее цифровые сигналы с блока АЦП (3.3) и блока позиционирования GPS-ГЛОНАСС (3.2) с помощью радиопередатчика с антенной (3.1) передаются на радиоприемник с антенной (4.1), расположенный на береговом посту (4). Приня-



**Рис. 4.** Вариации температуры (справа) и скорости звука (слева), измеренные в бухте Витязь на интервале времени 9 ч: **а** – акустические измерения с осреднением 30 мин, **б** – акустические измерения с осреднением 120 мин, **в** – гидрологические измерения с дискретностью  $0.5 \text{ ч}^{-1}$ .

тые приемником (4.1) сигналы синхронизируются с помощью сигналов блока системы точного времени (4.2) и поступают в блок регистрации (4.5) и блок корреляционной обработки (4.6).

В блоке корреляционной обработки (4.6) производится свертка принятых гидрофоном (2) сигналов с электронной маской сигнала, сформиро-

ванного в блоке формирования (4.3). Результаты корреляционной обработки поступают в блок управления и отображения результатов (4.7), где в реальном масштабе времени рассчитываются и отображаются на экране дисплея функции отклика акустического канала, времена прихода отдельных импульсов, а также рассчитанные по

временам прихода импульсов вертикальные профили скорости звука и температуры и вариации уровня поверхности в пространстве между излучателем и гидрофоном. В режиме реального времени корректируются уровни мощности и параметры излучаемого сигнала с помощью блока управления (4.7) на основании оценки качества полученных результатов измерений оператором.

Отличительными признаками разработанного комплекса от аппаратных схем, представленных в [2, 3], являются наличие берегового поста, оборудование поста и радиогидрофизического буя приемопередающей радиосистемой, соединение гидроакустического излучателя с береговым постом, а также оборудование берегового поста автономным блоком точного времени. За счет перечисленных конструктивных особенностей комплекса решается поставленная задача и достигается требуемый технический результат — оперативность проведения измерений и отображение результатов в режиме реального времени, обеспечивается надежность получения информации в периоды техногенных угроз и в экстремальных природных условиях, связанных как с водной средой, так и с состоянием атмосферы.

Управление параметрами излучения в реальном времени позволяет расширить технический диапазон 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.).

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Измерения параметров среды с помощью гидроакустического комплекса могут выполняться как в автоматическом режиме, так и под управлением оператора с помощью программы МИК [8]. Программа МИК написана в среде языка программирования MatLab 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.

Методика и отдельные расчетные блоки программы МИК разрабатывались на основе данных измерений функций отклика акустических каналов (ФОК) на стационарных трассах в 2003–2010 годах на шельфе Японского моря. Апробация методики

Уровень моря, м

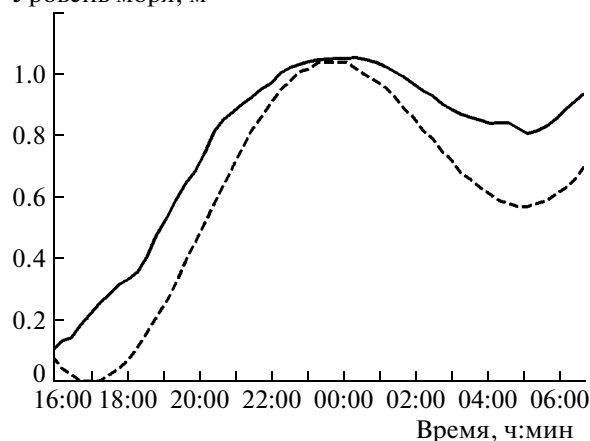


Рис. 5. Приливные изменения уровня моря по данным лоции (штриховая линия) и уровень моря, рассчитанный по результатам акустических измерений в Корейском проливе (сплошная линия).

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. 3 приведена 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 данных измерений амплитудно-временной структуры функций отклика канала и результатов предварительного моделирования функции отклика канала для конкретной схемы измерений.

После запуска программы осуществляется ввод и контроль данных измерения функции отклика акустического канала. Оператором выбирается временной интервал анализа ФОК и задаются начальные условия (интервалы) для следящих фильтров. В первом окне программы отображаются измеренная функция отклика акустического канала с амплитудно-временной структурой приходов импульсов во временной области, результаты работы следящих фильтров с 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 в зависимости от выбора рассчитанных значений скорости звука или температуры отображается их динамика во времени для заданного количества горизонтов, а также значения рассчитанного уровня моря вдоль трассы акустических измерений. Все

результаты отображаются в реальном масштабе времени без прореживания или осреднения.

На третьей рабочей панели программы отображается информация о районе работ и параметры акустической трассы (карта района работ, координаты, дистанция, глубины излучателя и приемника, гидрологические характеристики среды), где проводятся измерения. На данной панели также предусмотрен вывод результатов численного моделирования распространения звука для условий измерений. Численное моделирование, выделенное полужирным шрифтом на блок-схеме программы рис. 3, проводится в рамках отдельного пакета программ [5], адаптированного под расчет требуемых в программе параметров.

На четвертой панели отображаются, по выбору, графики изменений во времени вертикальной структуры скорости звука  $C(z, t)$  или температуры  $T(z, t)$  по усредненным во времени значениям, а также значения уровня моря  $H(z, t)$ , для которых также предусмотрен режим усреднения скользящим средним.

Программа МИК позволяет проводить измерения в режиме 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 вариант работы программы — это возможность работы в режиме удаленного доступа. Для этого необходимо обеспечить передачу информации об измеренных  $\Phi OK$  в место расположения персонального компьютера с программой. Обработка данных и отображение информации будут проводиться либо в режиме реального времени, либо с небольшой задержкой на время получения первичной информации измеренных  $\Phi OK$ . Также данную программу можно использовать для автоматизации обработки больших объемов экспериментальных данных, полученных, например, в экспедиционных условиях.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Далее приведены примеры совместных контактных инструментальных и акустических измерений параметров, выполненные в режиме мониторинга (в реальном времени). На рис. 4 представлены измеренные с помощью гидрофизического 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 на стационарной трассе в акватории бухты Витязь. Время измерений с 18:00 до 03:00 часов.

Вариации параметров, измеренных разными методами, коррелируют между собой при дискретности гидрологических измерений  $0.5 \text{ ч}^{-1}$  и

осреднении параметров среды, измеренных акустическим методом на интервале 2 ч. В более высокочастотной области вариаций параметров среды (на интервалах времени  $< 1 \text{ ч}$ ) корректно сравнивать результаты не представляется возможным из-за низкой частоты гидрологических измерений. На рис. 5 приведены графики вариаций уровня моря, построенные по данным лоции и рассчитанные по результатам акустических измерений с помощью программы МИК в Корейском проливе. Максимальная невязка между результатами уровня по лоции и расчетами по данным акустических измерений составляет до 20% в области минимального значения прилива и уменьшается до 1–5% в течение остального времени наблюдений. Отличия по фазе между графиками наблюдаются только в области первого минимума прилива (рис. 5). 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, так же как и инструментальные измерения уровня в области трассы, не проводился.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционные акустические измерения вертикальных распределений профиля скорости звука, температуры и уровня поверхности мелководных акваторий, осуществляемые в реальном времени с высокой частотой выборок, могут использоваться для оперативного контроля параметров среды в рамках задач экологического мониторинга и защиты от техногенных угроз прибрежных районов. В отличие от контактных измерений и дистанционных методов вертикального зондирования с использованием расположенных на поверхности водных акваторий платформ-носителей, в данном случае проводится 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 минуту и более на периодах времени более года. Также имеется возможность выполнять мониторинг вертикального профиля скорости звука и температуры во времени в экстремальных условиях на тестируемых акваториях: в штормовых условиях, подо льдом, в акваториях при наличии в воде опасных веществ или при ведении производственной деятельности, исключающей контактные методы измерений или возможность использования плавучих средств. Таким образом, использование метода дополняет и расширяет возможности стандартных гидрологи-

ческих измерений параметров среды с одновременным снижением затрат на проведение гидрофизических наблюдений за водными акваториями.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acoustic Sensing Techniques for the Shallow Water Environment. Inversion Methods and Experiments – 2nd Workshop 28–30 June 2004, Ischia, Italy / Eds A.Caiti., N.R.Chapman., J.-P. Hermand., S.M. Jesus. ISBN-10 1-4020-4372-4 (НВ), ISBN-13 978-1-4020-4386-4 (e-book), www.springer.com, Springer, 2006.
2. Jesus S.M., Soares C., Silva A., Coelho E. // Proceedings of European Conference on Underwater Acoustics (ECUA' 2004). 2004. P. 271.
3. Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю. и др. // Доклады XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета по акустике РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 225.
4. Akulichev V.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V. et al. // Ocean Science J. 2006. V. 41. № 2. P. 105.
5. Половинка Ю.А. Свидетельство о гос. регистрации № 2011618440 // ОБПБД. 2012. № 1. С. 182.
6. Mackenzie K.V. // J. Acoust. Soc. Am. 1981. V. 70. P. 807.
7. Безответных В.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. и др. Патент РФ № 115929 U1 // БИПМ. 2012. № 13.
8. Половинка Ю.А., Азаров А.А., Лебедев М.С. Свидетельство о гос. регистрации № 2012610166 // ОБПБД. 2012. № 3. С. 202.