

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРИИ ШЕЛЬФОВЫХ ЗОН ОКЕАНА

Ю.Н. Моргунов

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН
им. В.И. Ильичева
Владивосток
E-mail: morgunov@poi.dno.ru

«Better Life through Acoustics» – под таким броским девизом проходила IX акустическая конференция в Сеуле. Действительно, трудно представить себе области науки или хозяйственной деятельности, связанные с океаном, в которых не применялись бы акустические методы и приборы. Глобальные проблемы изменения климата, катастрофические явления в природе, связанные с динамическими процессами в океане, требуют углубленных теоретических и экспериментальных исследований в этой сфере с применением новейших технологий. На смену традиционным контактными методами измерений в океанологии все чаще приходят дистанционные спутниковые и акустические методы исследований динамики и структуры водных масс и донных осадков. Бурно развиваются акустическая томогра-

фия и способы передачи информации по гидроакустическому каналу. Актуальной становится задача развертывания широкомасштабных систем наблюдения и освещения подводной обстановки и долговременного глобального мониторинга. К сожалению, необходимо констатировать, что, несмотря на паритет с зарубежными исследователями в области теоретических аспектов акустической томографии морской среды, экспериментальная апробация и внедрение в океанологическую практику новейших методов и средств акустического зондирования морской среды у нас в стране существенно отстают.

В настоящей статье рассматриваются некоторые результаты исследований, связанных с решением данной проблемы. К числу наиболее актуальных направлений относятся:

- разработка методологии акустико-гидрофизического эксперимента для развития методов акустической томографии в условиях специализированного натурального полигона;

- теоретические и экспериментальные исследования процессов распространения широкополосных импульсных сигналов в различных гидрологических условиях для получения амплитудно-временных и угловых параметров импульсных характеристик, необходимых для решения прямых и обратных задач гидроакустики;

- развитие систем генерации, излучения и приема сложных фазоманипулированных сигналов для зондирования неоднородностей морской среды различных масштабов и передачи информации по гидроакустическому каналу на акваториях протяженностью от единиц до сотен километров.

Рис. 1
Акустико-гидрофизический полигон ТОИ ДВО РАН



Рис. 2
Акустико-гидрофизический комплекс



Для проведения широкомасштабных экспериментальных исследований на морской экспедиционной базе ТОИ ДВО РАН, находящейся на м. Шульца в зал. Посыета, был создан акустико-гидрофизический полигон, оборудованный современными техническими средствами излучения, приема и обработки сигналов [1, 2]. Важно, что уникальное географическое положение полигона позволяет проецировать получаемые научные результаты на многие районы Мирового океана. На представленной фотографии (рис. 1) скалистые склоны м. Шульца, видимые слева, опускаются в шельфовую зону Японского моря, а далее простирается открытый океан. В правой части фотографии видна глубоководная (до 38 м) бух. Витязь. Указанные достоинства полигона позволили нам организовать и провести целый ряд экспериментов с участием специалистов Акустического института им. Н.Н. Андреева (Москва), Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва), Института проблем морских технологий (Владивосток), США (Вашингтонский универ-

ситет, г. Сиэтл), КНР (Харбинский инженерный университет), Республики Корея (Сеульский университет). На рис. 2 представлены возможности размещения технических средств на акватории полигона для проведения исследований. С их использованием, в рамках российско-американо-корейского проекта, в 1999 г. проведено исследование методами акустической томографии динамических процессов на шельфе и в зоне северного полярного фронта Японского моря [3, 6]. Подтверждена эффективность методов для мониторинга мелкомасштабных неоднородностей морской среды (внутренние волны, приливы) и пространственного смещения фронтальной зоны.

Многолетний опыт проведения экспериментальных работ на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН подтвердил эффективность полигонных исследований для решения широкого круга задач по апробации в натуральных условиях новых методов и технических средств. Данный раздел статьи можно рассматривать и как рекламное приглашение

специалистов в областях гидрофизики и подводной акустики для проведения исследований на нашем полигоне.

Ниже приводится более подробное описание одного из экспериментов по термометрии шельфа Японского моря, которые демонстрируют методические и технические возможности дистанционных акустических методов.

Шельфовые зоны океанов и морей являются ключевыми объектами для исследования физических процессов, влияющих на климат, экологию, эффективность охраны морских границ. Рыбная отрасль России в настоящее время существенно переориентирована на добычу в прибрежных районах. Идет развитие инфраструктуры фермерских хозяйств по разведению марикультуры. Правильный выбор мест, глубин и интервалов времени для лова и разведения биообъектов существенно зависит от знания структуры и динамики водных масс. Применение традиционных контактных океанологических приборов в данном случае малоэффективно, так как техническая реализация размещения измери-

тельных средств на разных глубинах во всем водном слое в мелководных районах с интенсивным рыболовством и сильными течениями связана с большими материальными затратами и рисками. В этой связи актуальной становится разработка методов акустической термометрии, основанных на реконструкции поля температур по измеренным временам пробега звуковых импульсов вдоль лучей, соединяющих установлен-

ные на дне источник и приемник звука.

Детальное описание инверсии по времени распространения может быть найдено в работе [4]. Коротко, метод базируется на допущении, что для малых возмущений профиля скорости звука

$$\delta c(z) = c(z) - c_0(z) \ll c_0(z)$$

изменение времени распространения акустического импульса может быть записано в виде

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

где интеграл в уравнении берется вдоль невозмущенных собственных лучей Γ_j . Для набора из T возмущений времен распространения и при дискретизации вертикального профиля скорости звука в воде на L слоев можно связать вектор задержек $\Delta \tau_i = [\Delta \tau_1, \Delta \tau_2, \dots, \Delta \tau_T]$ с вектором возмущений профиля скорости звука

$$\delta \tau_i = [\delta \tau_1, \delta \tau_2, \dots, \delta \tau_T]$$

Техническая реализация метода может быть основана на применении сложных фазоманипулированных сигналов для зондирования морской среды с последующим вычислением взаимной корреляционной функции принятого и излученного сигналов. При правильном выборе частотного диапазона и параметров сигналов это позволяет разрешить во времени отдельные приходы акустической энергии, которые напрямую связаны со скоростью распространения акустической энергии по различным траекториям и температурой в соответствующих слоях.

Возможности дистанционных акустических методов измерения и мониторинга температурных полей можно проиллюстрировать на примере результатов, полученных при изучении взаимодействия гидроакустических и температурных полей в мелководной шельфо-

вой зоне Японского моря. Как показано в ряде работ отечественных и зарубежных специалистов по подводной акустике, экспериментальное обоснование и техническое обеспечение подобных исследований является новым и перспективным. Оно связано с решением таких актуальных проблем, как прогноз изменения климата, внедрение экологически сбалансированных технологий добычи рыбы, регулирование и восполнение биоресурсов и пр.

Ряд экспериментов для подтверждения возможностей дистанционных методов был проведен на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН в Японском море в августе–сентябре 2004–2005 гг. В этот период здесь была организована стационарная акустическая трасса. Широкополосный акустический излучатель был установлен в 400 м от берега на глубине 39 м при глубине места 40 м. Каждую минуту в течение суток излучались сложные фазоманипулированные сигналы с центральной частотой 2500 Гц в виде М-последовательностей, состоящих из 511 символов. Приемный гидрофон устанавливался на удалении 2 км от излучателя вблизи дна при глубине моря 43 м. В береговой лаборатории в реальном масштабе времени вы-

числялась функция взаимной корреляции между принятыми и излученными сигналами, и таким образом определялись вариации времен пробега импульсов по различным траекториям. В точке приема на время проведения исследований устанавливалась на якорь яхта, с которой осуществлялись ежечасные измерения вертикальных профилей температуры и солености морской воды. Результаты измерения температуры в августе и сентябре приведены соответственно на рис. 3,а и 4,а. Видно, что гидрологические условия и в августе, и в сентябре характеризовались периодическими полусуточными изменениями поля температур с двухмодовым характером распространения внутреннего прилива по шельфу, т. е. в момент захода холодных вод в придонные слои, теплая вода с поверхности опускается вниз.

На рис. 3,б и 4,б приведены вариации времен приходов, полученных в августе и сентябре на данной акустической трассе. Как видно, в обоих случаях с изменениями температуры в придонном слое наиболее четко коррелируют времена поздних приходов акустических импульсов. При подходе придонных холодных вод на акустическую трассу между излучателем и приемником отмечаются подъем термоклина и, как следствие, формирование придонного звукового канала. Это приводит к тому, что основная энергия распространяется по лучам с малыми углами скольжения, с минимальными групповыми скоростями. В период отлива, когда теплые слои воды опускаются и ширина придонного канала уменьшается, происходит перераспределение энергии в верхнюю часть волновода и фиксируются более мощные ранние приходы, сформированные лучами с крутыми углами скольжения, с более высокими групповыми скоростями.

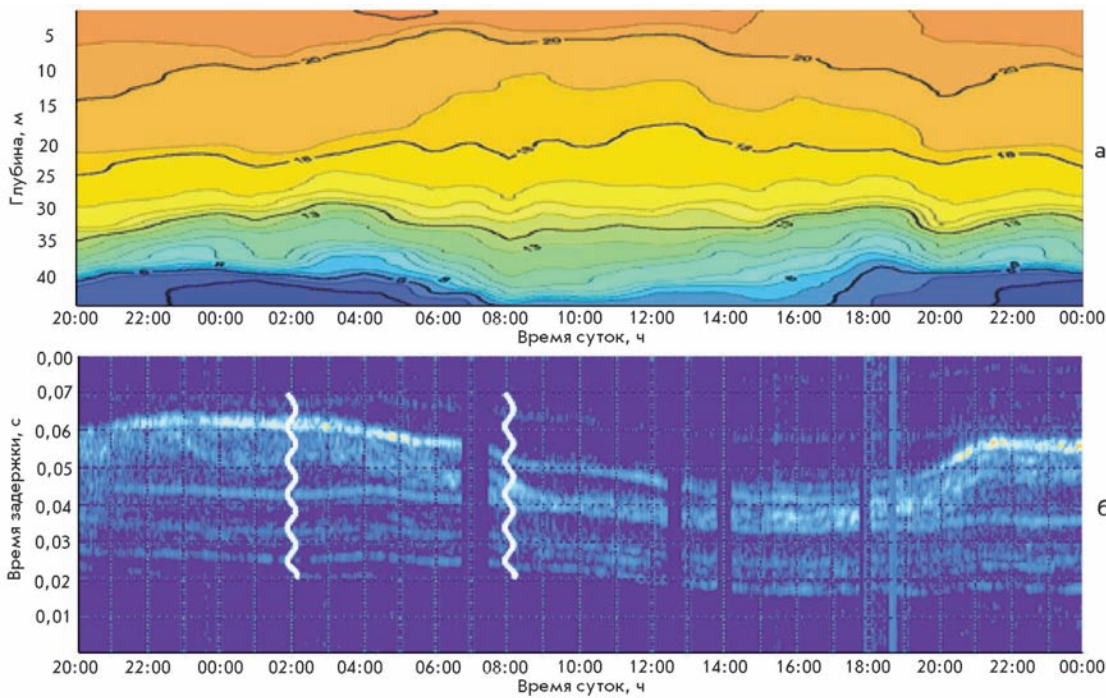


Рис. 3
 а — зависимость температуры воды от времени суток и глубины;
 б — вариации импульсной характеристики канала распространения звука

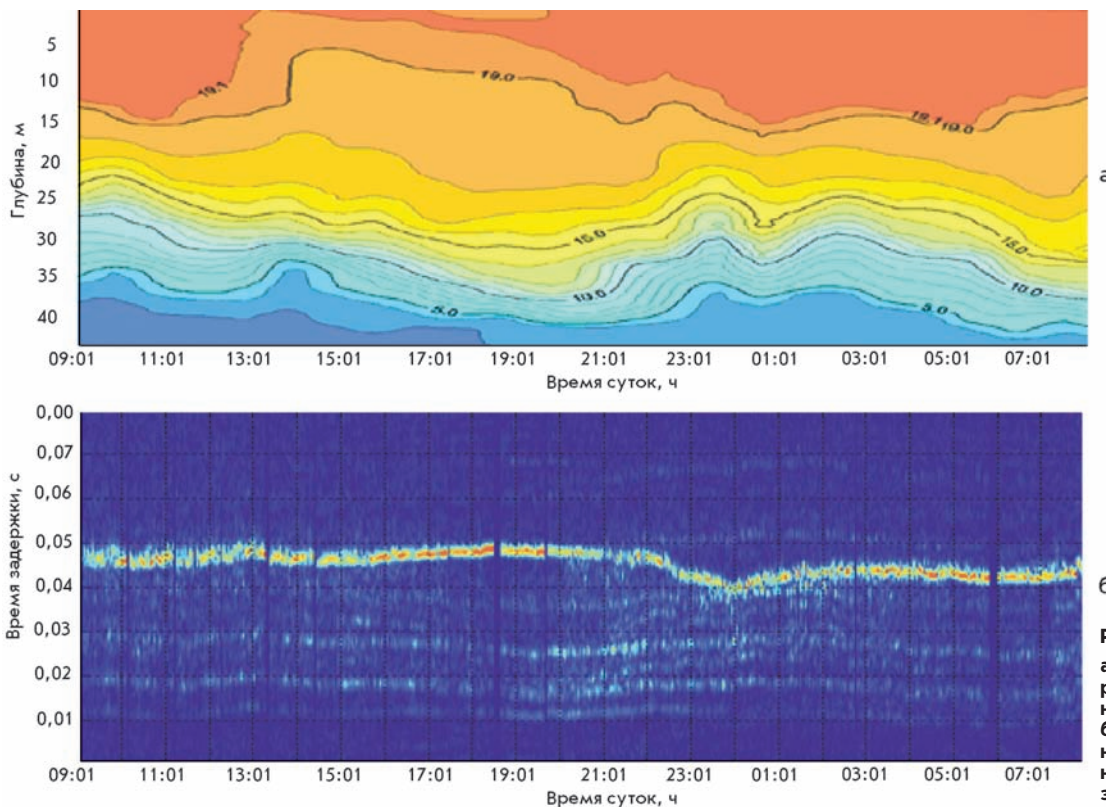


Рис. 4
 а — зависимость температуры воды от времени суток и глубины;
 б — вариации импульсной характеристики канала распространения звука

При этом в сентябре, когда с 19:00 до 22:00 толщина термоклина уменьшается (рис. 4,а), отмечается уменьшение времен приходов импульсов с максимальной амплитудой с 23:00 до 01:00 (сдвиг во времени 3 ч). Это видно на рис. 4,б. В августе

те же, когда придонный звуковой канал с 08:00 до 17:00 практически исчезает, (рис. 3,а), происходит полное перераспределение энергии на более ранние приходы с тем же трехчасовым сдвигом во времени (см. рис. 3,б). Это может быть обус-

ловлено тем, что измерение температуры осуществлялось в точке приема и именно за это время акустическая трасса, ориентированная приблизительно перпендикулярно направлению распространения приливного фронта, максимально за-

полняется или холодной, или теплой водой.

Суточные зависимости вариаций ранних приходов акустической энергии, сформированных крутыми лучами, имеют более сложный характер, но даже качественный анализ показывает, что они коррелируют с температурной изменчивостью в верхних слоях волновода. Например, на рис. 3,б показано, что с 20:00 до 04:00 ч времена ранних приходов уменьшаются. То же самое наблюдается на рис. 4,б с 17:00 до 22:00 ч. Это соответствует опусканию теплых вод в данные интервалы времени в более глубокие слои (рис. 3,а и 4,а).

Для более точной идентификации лучевых приходов проводилось численное моделирование с использованием методов лучевой акустики [5]. На рис. 5 приведены расчетные и экспериментально полученные импульсные характеристики данного волновода для двух характерных моментов прохождения приливного фронта, отмеченных на рис. 3,б извилистыми линиями. Хорошее соответствие расчетных и экспериментально полученных амплитуд и времен пробега звуковых импульсов по различным лучевым траекториям позволяет рассчитывать на успешное решение задач рекон-

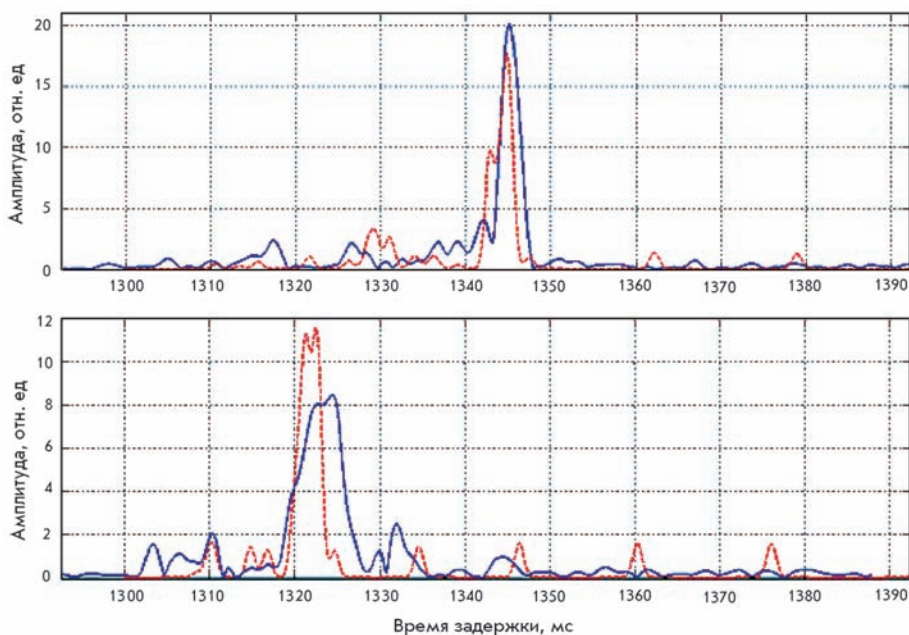


Рис. 5
Импульсные характеристики канала распространения звука для времени **02:00** (верхний) и для **08:00** (нижний). Синяя сплошная линия – эксперимент; красная пунктирная – расчет

струкции температурных полей. Важно отметить, что технически несложно организовать передачу информации об изменении придонной температуры в точке размещения источника звука путем изменения излучаемых кодов. В совокупности с возможностью спутникового наблюдения за поверхностной температурой на всей трассе это позволит повысить точность при решении обратной задачи.

В заключение можно отметить, что экспериментальные результаты подтверждают одно-

значную связь между временами пробега акустических импульсов в различных слоях диагностируемого волновода и температурой на этих глубинах. Можно также утверждать, что предложенная и экспериментально апробированная в различных гидрологических условиях методика и аппаратура имеют достаточную чувствительность для проведения исследований и мониторинга структуры и динамики температурных полей в мелководных акваториях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Гриценко А.В., Захаров В.А., Кабанов Н.Ф., Ковзель Д.Г., Моргунов Ю.Н., Рутенко А.Н., Стародубцев Ю.И. Акустико-гидрофизический полигон (шельф Японского моря) // Акуст. журн. 1994. Т. 40, № 2. С. 333.
2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В., Пенкин С.И. Акустогидрофизический комплекс для морских томографических исследований // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 6. С. 112-115.
3. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В. Акустическая томография динамических процессов водной среды в шельфовой зоне Японского моря // ДАН. 2001. Т. 381, № 2. С. 243-246.
4. Munk W.H., Wunsch C. // Deep-Sea Research. 1979. V. 26, № 2A. P.123-161.
5. Porter M.B., Bucker H.P. «Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields» // J. Acoust. Soc. Amer. 1987. N 82. P. 1349-1359.
6. Spindel R.S., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.-G., Akulich V.A., Morgunov Yu.N. Acoustic Tomography for Monitoring the Sea Japan: A Pilot Experiment // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2003. V. 28, N 2. P. 297-302.