

УДК 534.222

ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАССАХ ПРИ СЛОЖНЫХ ГИДРОЛОГО-АКУСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И ПЕРЕМЕННОМ РЕЛЬЕФЕ ДНА

**В.В. Безответных, А.В. Буренин,
Е.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов**

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

Анализируются результаты экспериментальных исследований особенностей распространения низкочастотных акустических импульсных сигналов из шельфа в глубокое море, которые позволили разработать технологию управления подводными объектами на расстояниях в сотни километров с применением стационарных источников навигационных и связных сигналов, не требующих длинных кабельных линий.

ВВЕДЕНИЕ

Создание современных технических средств исследования и освоения океана на базе подводных аппаратов различного назначения является приоритетным направлением развития науки и технологий. Актуальными являются проблемы по созданию необитаемых подводных аппаратов и обсерваторий, обеспечивающих комплексное и широкомасштабное обследование морских акваторий и дна океана и получение новых фундаментальных знаний в области океанографии, морской геологии, биологии и энергетики [1]. Значительный прогресс в разработках этих технологий потребовал создания низкочастотных систем навигации и связи с зоной действия в сотни километров. Основной проблемой для достижения необходимой точности определения дистанции до подводного объекта является учет изменчивости скорости звука на трассе

распространения, связанной с неоднородностью рельефа дна (прогрев мелководных участков трассы в осенне-летний период) и динамическими процессами в морской среде (внутренние и приливные волны, фронтальные разделы и т.п.).

Цель настоящей работы заключалась в получении экспериментальных данных по особенностям распространения низкочастотных фазоманипулированных сигналов в сложных гидролого-акустических условиях и переменного рельефа дна для разработки мобильных, не требующих длинных кабельных линий, высокоточных систем дальней навигации подводных объектов для управления ими с береговых постов. В задачи работы входило: 1) исследование временной структуры и стабильности импульсных характеристик волноводов, 2) исследование скоростей распространения отдельных импульсов на акустических трассах, включающих шельф,

континентальный склон и глубокое море.

■ Аппаратура и методика

Эксперимент проводился в Японском море в августе 2006 года в течение 3-х суток и заключался в излучении сложных сигналов из шельфовой зоны и их приеме в шести точках на трассе при удалении от излучателя от 55 до 368 км. Применение сложных фазоманипулированных сигналов позволило выделить и идентифицировать приходы акустической энергии по различным лучевым траекториям между источником и приемником звука, т.е. измерить импульсную характеристику волновода [2–4]. На рис. 1 и 2 приведено схематическое изображение геометрии проведения исследований. Гидрологические условия на мелководном участке трассы характеризовались наличием отрицательного градиента скорости звука от поверхности

до дна, а в глубоком море наличием оси подводного звукового канала (ПЗК), заглубление оси которого увеличивается от 100 до 220 м при удалении от берега на юг (рис. 3). Волнение моря во время проведения измерений не превышало 3-х баллов. Рельеф дна по трассе приведен на рис. 2. Плотность песчаного грунта на мелководном участке трассы равнялась 1800–2000 г/см³.

Широкополосный пьезокерамический излучатель размещался в 450 м от берега в одном метре от дна при глубине места 40 м. Излучение сложных фазоманипулированных сигналов (М-последовательностей, 511 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 600 Гц и шириной полосы 300 Гц осуществлялось каждые пять минут. Сигнальный пакет состоял из трех посылок длительностью 3,4 с и периодом повторения 6 с. Излучение и прием сигналов в каждой из шести точек на трассе осуществлялся в течение нескольких часов. В точке, удаленной на 368 км, сигналы не выделялись из помех, и по команде с приемного судна была изменена центральная частота на 366 Гц. При этом излучались те же М-последовательности, но с длительностью 5,6 с. Временное разрешение отдельных импульсов при зондировании сигналами с центральными частотами 366 и 600 Гц составляло 3 мс и 2,5 мс соответственно.

Пункт приема сигналов был оборудован на яхте, с которой в заданных точках на исследуемой трассе осуществлялась постановка радиогидроакустического буя с гидрофоном. Гидрофон заглублялся приблизительно до оси ПЗК, местоположение которой определялось при измерении вертикального распределения скорости звука гидрологическим зондом STD-1000 с яхты

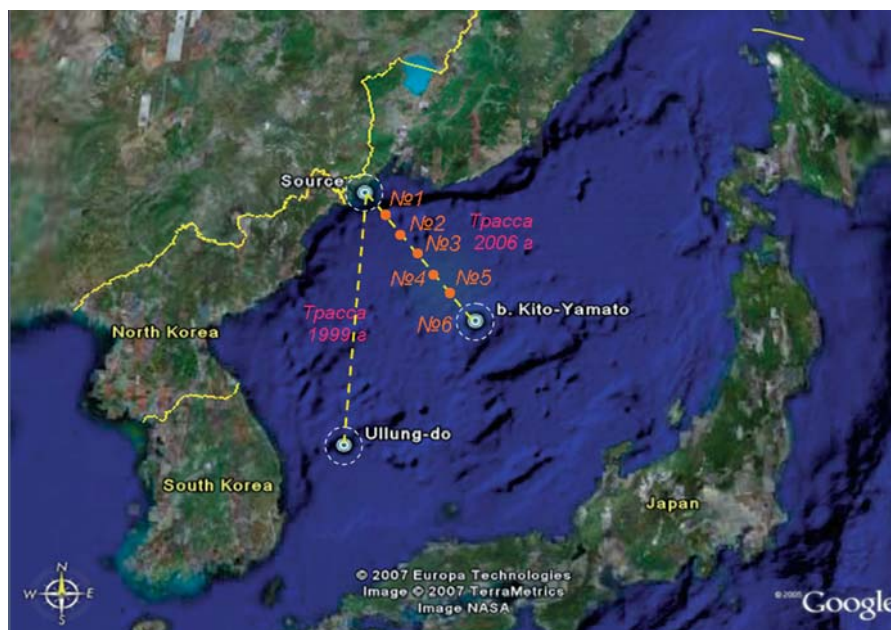


Рис. 1. Схема экспериментов: трасса 1999 года и трасса 2006 года

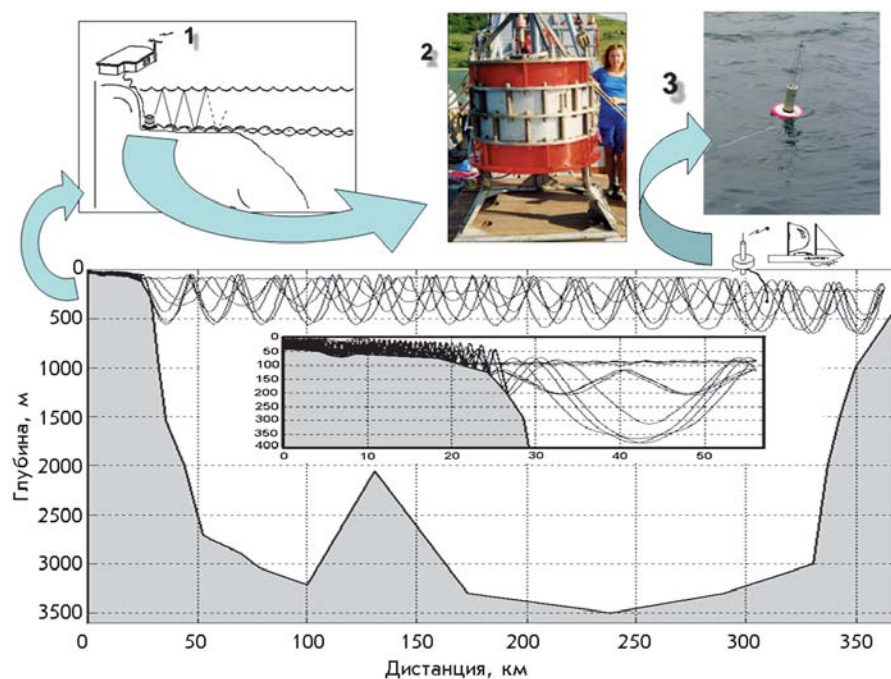


Рис. 2. Рельеф дна и расчет лучевых траекторий на диагностируемой трассе: 1 – береговой пост; 2 – излучатель; 3 – приемная система

(рис. 3). Приборная точность измерения скорости звука составляла 0,01 м/с, глубины – 0,1 м. Буй с гидрофоном после постановки в заданной точке дрейфовал, а яхта маневрировала под парусом в зоне уверенного приема радиосигналов. Маневрирование осуществлялось таким образом, чтобы за сеанс приема сигналов яхта несколь-

ко раз прошла вблизи буя для измерения его координат по данным спутниковой системы навигации GPS. Максимальная ошибка в определении координат этой системой была определена перед экспериментом у пирса и составила 18 м. Необходимо отметить, что измеряемые координаты буя могли отличаться от координат гидро-

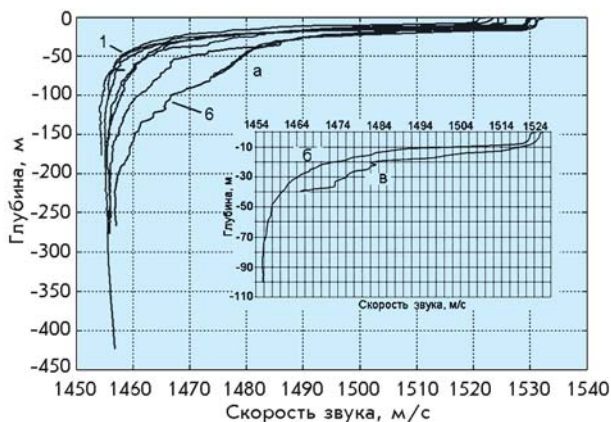


Рис. 3
Вертикальные разрезы скорости звука:
а – в точках 1–6;
б – у излучателя;
в – в 16-ти км от излучателя

фона на 10–20 м из-за дрейфа буя, т.е. суммарная среднеквадратичная ошибка в измерении дистанции между корреспондирующими точками могла достигать 40 м. Во время каждого сеанса приема осуществлялась запись сигнальной информации и меток с системы единого времени на персональный компьютер (ПК). Системы единого времени, изготовленные на базе термостабилизированных генераторов (относительная точность счета времени не менее 10^{-8} с), включались в излучающие и приемные системы и запускались перед началом эксперимента.

■ Экспериментальные результаты

Обработка информации заключалась в вычислении взаимной корреляционной функции между принятыми $S(t)$ сигналами и маской излученного $S_0(t)$ сигнала, предварительно записанной на ПК:

$$K_{ss_0}(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(\omega)|^2 \cdot G(\omega, \vec{r}) \cdot e^{i\omega t} d\omega,$$

где $S_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$ – спектр Фурье излученного сигнала;
 $G(\omega, \vec{r}) = \sum_{j=1}^N A_j(\vec{r}) \cdot e^{-i\omega t_j(\vec{r})}$ – функция Грина; $t_j(\vec{r})$ и $A_j(\vec{r})$ – соответственно время распространения и амплитуда сигнала,

распространяющегося по j -му лучу от источника до приемника, расположенного в точке \vec{r} ; N – число лучей, приходящих на приемник.

На полученных таким образом импульсных характеристиках волноводов во всех шести точках фиксировалось в основном два прихода акустической энергии с разницей во времени 15–30 мс. На рис. 4 приведены характерные примеры импульсных характеристик, полученных за сеансы измерений в точках № 1–6. Самый поздний импульс идентифицировался как прошедший вблизи оси

ПЗК, т.к. он распространялся с минимальной скоростью звука. Изменчивость импульсных характеристик в течение 55 и 40 мин в точках 2 и 6 иллюстрирует рис. 5. В обоих случаях по временам приходов импульсов четко прослеживается дрейф приемной системы.

Важным и несколько неожиданным оказалось то, что результаты расчетов дистанций между излучателем и приемником во всех точках измерений по трассе, полученные умножением времен поздних приходов на скорость звука на оси ПЗК, довольно точно совпадают с данными позиционирования по GPS. Эти результаты для моментов времени, соответствующих началу и концу приема сигналов, приведены в скобках в последнем столбце таблицы. Анализ этих данных показал, что ошибка в измерении дистанций для первых трех точек смещена в сторону уменьшения. Естественно было предположить, что причиной этого являлось наличие на трассе 16-километрового отрезка шельфовой зоны с глубинами от 40 до 100 м с более теплой

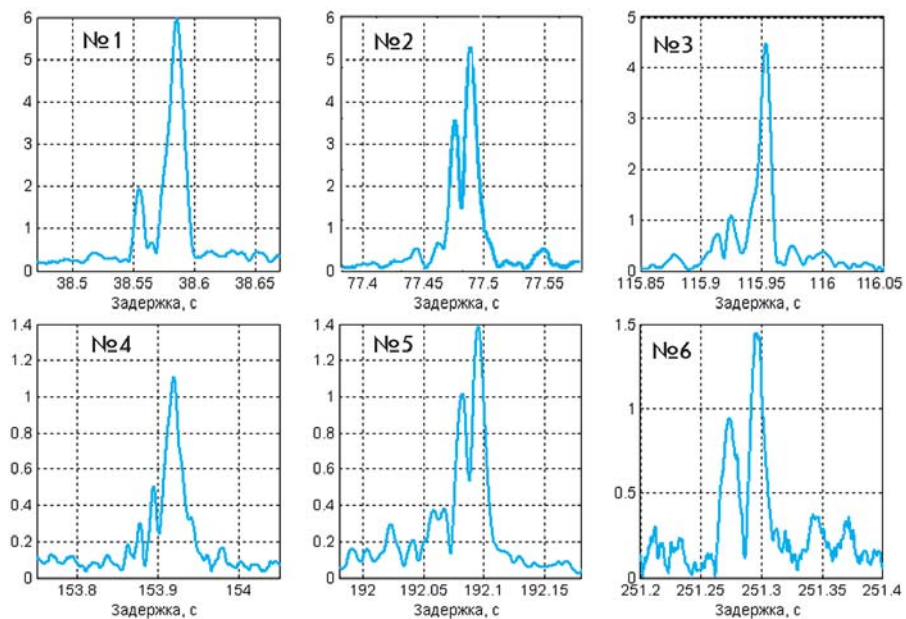


Рис. 4. Импульсные характеристики волновода на различных удалениях от излучателя (точка № 1 – 56 км, точка № 2 – 113 км, точка № 3 – 169 км, точка № 4 – 224 км, точка № 5 – 279,5 км, точка № 6 – 368 км)

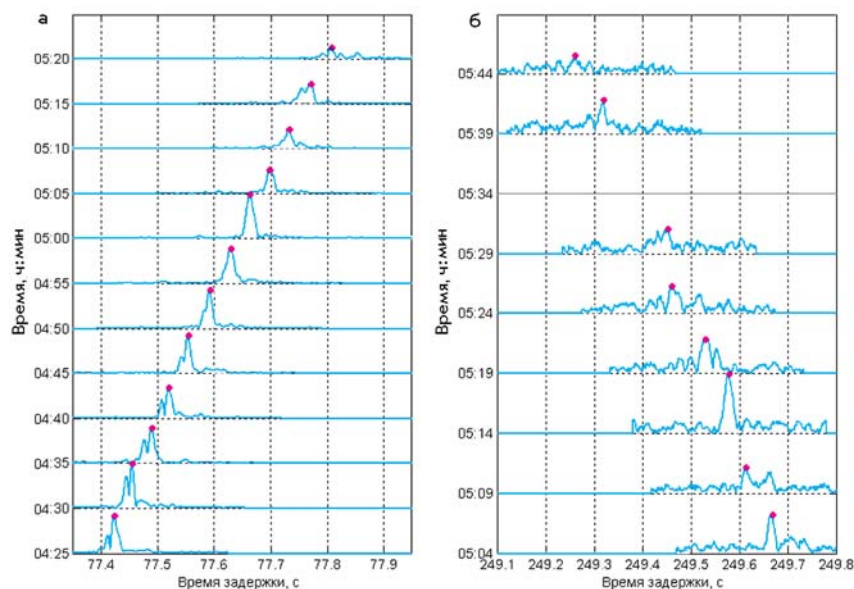


Рис. 5. Импульсные характеристики волновода, полученные при дрейфе приемной системы: а – точка № 2, дистанция 112 км; б – точка № 6, дистанция 368 км

водой, чем в глубоком море. Скорость звука, измеренная у дна в точке расположения излучателя, составляла 1465 м/с, а на расстоянии 16 км – 1457 м/с (рис. 2). Таким образом, средняя скорость звука у дна на шельфе $V_{ш} = 1461$ м/с превышает скорость звука на оси ПЗК.

В таблице для каждой точки наблюдений по трассе приведены следующие данные: во втором столбце – время начала и окончания измерений; в третьем – время распространения импульсов с максимальной амплитудой и максимальным временем распространения; в

четвертом – скорость звука $V_{ПЗК}$ на оси ПЗК; в пятом – среднее значение $V_{ср}$ скорости звука на трассе с учетом скорости звука на шельфе $V_{ш}$, определяемое выражением:

$$V_{ср} = V_{ш} \cdot \frac{R_{ш}}{(R_{ПЗК} + R_{ш})} + V_{ПЗК} \cdot \frac{R_{ПЗК}}{(R_{ПЗК} + R_{ш})},$$

где $R_{ш}$ – длина части трассы на шельфе, а $R_{ПЗК}$ – длина части трассы в глубоком море. В шестом и седьмом столбцах таблицы приведены расчеты дистанции по измеренным временам распространения и значениям скорости звука $V_{ПЗК}$ и $V_{ср}$ соответственно. В восьмом столбце указаны дистанции для времен начала и окончания измерений по данным позиционирования GPS.

Отличия в расчетах дистанций в точках акустических экспериментов по трассе и данных позиционирования в этих точках по GPS приведены в последнем столбце таблицы. Первое значение в скобках

Параметры наблюдений по трассе акустического сигнала

| № п/п | Дата и время записи | Время распространения на начало и конец записи, с | Скорость звука на оси ПЗК, м/с | Средняя скорость звука на трассе, м/с | Дистанция, рассчитанная по скорости звука на оси ПЗК, км | Дистанция, рассчитанная по средней скорости звука на трассе, км | Дистанция по GPS, км | Ошибка при измерении дистанции, м |
|-------|------------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------------|--|---|----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 24.08.2006 21:35 23:07 | 38,59 38,51 | 1455,05 | 1456,60 | 56,145 56,029 | 56,205 56,089 | 56,236 56,146 | (91) 31 (117) 57 |
| 2 | 25.08.2006 04:25 05:25 | 77,42 77,80 | 1455,65 | 1456,12 | 112,701 113,256 | 112,736 113,291 | 112,760 113,392 | (59) 24 (136) 101 |
| 3 | 25.08.2006 10:30 12:09 | 115,91 116,54 | 1454,10 | 1454,96 | 168,556 169,458 | 168,645 169,558 | 168,760 169,621 | (214) 115 (163) 63 |
| 4 | 25.08.2006 17:35 19:40 | 153,95 153,76 | 1455,45 | 1456,02 | 224,059 223,784 | 224,148 223,846 | 224,110 223,774 | (51) 38 (10) 96 |
| 5 | 26.08.2006 02:15 03:59 | 192,07 192,10 | 1455,40 | 1455,86 | 279,539 279,579 | 279,627 279,676 | 279,583 279,592 | (44) 46 (13) 84 |
| 6 | 26.08.2006 20:03 05:30 | 252,91 249,27 | 1456,76 | 1457,02 | 368,428 363,127 | 368,495 363,192 | 368,539 363,046 | (111) 44 (81) 146 |

соответствует расчету дистанции по скорости $V_{ПЗК}$, второе – по $V_{ср}$. Таким образом, корректировка средней скорости звука на квазистационарных трассах во всех точках путем суммирования средней скорости на шельфе и скорости на оси ПЗК в пропорциях, соответствующих расстояниям, пройденным сигналом на шельфе и в глубоком море, позволяет существенно уменьшить ошибку расчета дистанций в первых трех точках трассы. Ошибка может быть еще уменьшена, если имеется возможность передачи данных о распределении скорости звука на шельфе в вертикальной и горизонтальной плоскостях на приемную систему. Это позволит более точно рассчитать скорость распространения импульсов по лучевым траекториям.

Физическую картину формирования акустического поля, иллюстрирующую основные результаты экспериментальных исследований, можно представить следующим образом. Расположение источника звука у дна и наличие отрицательного градиента скорости звука в придонном слое воды приводит к формированию придонного звукового канала в шельфовой зоне, в котором основная акустическая энергия распространяется под углами скольжения, близкими к нулевым. При переходе в глубокое море она «захватывается» ПЗК и распространяется вблизи его оси, «отслеживая» все ее перемещения в вертикальной плоскости. С этим связано отсутствие зон тени и формирование стабильной импульсной характеристики в течение всего эксперимента. Можно предположить, что подобного естественного эффективного согласования местоположения источника звука с характеристиками ПЗК сложно достичь при его стационарном размещении вблизи свала

глубин, т.к. значительные перемещения оси ПЗК по глубине на этом динамичном участке трассы могут вызвать формирование зональной структуры акустического поля в глубоком море. Результаты, полученные нами в американо-российско-корейском эксперименте по проекту JESAEX (The Japan/East Sea Acoustics Experiment) в Японском море на стационарной трассе протяженностью 557,29 км [5], также могут быть использованы для решения задач, поставленных в настоящей работе. Эксперимент проводился в сентябре–октябре 1999 г. с использованием того же источника звука и аналогичных сигналов. Было зафиксировано также два прихода акустической энергии с временами 382,5 и 382,54 с. Скорость звука на оси ПЗК в точке приема равнялась 1457,47 м/с, а ее изменение по трассе не превышало 1–2 м/с. В данном случае рассчитанная дистанция отличается от измеренной GPS на 250 м, т.е. 0,04% от измеренной дистанции. При этом гидролого-акустические условия при проведении этих исследований существенно отличались от условий в обсуждаемом выше эксперименте. Общим было только наличие практически одинаковой скорости звука на оси ПЗК на всей трассе. Азимутальный угол наблюдения равнялся $183,5^\circ$, т.е. отличался на 42° к югу от угла наблюдения в эксперименте 2006 г. (рис. 1). Схожие результаты обсуждаются в работе Тапперта и других [6]. Распространение акустических сигналов с малыми углами скольжения из шельфа на ось ПЗК, расположенную на 800 м в глубоком море, вблизи Гавайских островов, авторы называли эффектом «оползня».

В заключение сформулируем основные результаты исследований.

1. Размещение источника звука у дна на шельфе, вблизи береговой черты, позволяет сформировать в глубоком море, вблизи оси ПЗК, сплошную зону освещенности и стабильную импульсную характеристику с двумя основными приходами акустической энергии, с углами, близкими к нулевым, на расстояниях до 500 км. Это обусловлено оптимальным согласованием местоположения источника звука и параметров излучаемых сигналов с гидролого-акустическими характеристиками морской среды на трассе, типичными для лета и осени в Японском море, для эффективного возбуждения и распространения низкочастотных сигналов.

2. Экспериментально показано, что скорость распространения самого позднего импульса равна, практически в пределах ошибки измерений, скорости звука на оси ПЗК в точке расположения приемной системы. Это позволило с точностью до сотых процента измерять дистанцию до приемной системы в каждой из шести точек на трассе протяженностью 368 км. Продемонстрирована методика уменьшения ошибки измерений путем учета изменчивости скорости звука в шельфовой части трассы.

3. Схожие результаты наших исследований 1999 и 2006 г. и приведенные в [6], при существенных отличиях гидролого-акустических характеристик морской среды во время экспериментов, позволяют рассчитывать на возможность их использования и в других районах Тихого океана и прилегающих морей, в которых на шельфе с малым наклоном дна сформирован отрицательный градиент скорости звука, а в глубоководных районах – ПЗК.

ВЫВОДЫ

Суммируя изложенное выше, можно заключить, что разработанные технические средства и методика выполнения работ могут быть использованы для целей навигации и управления подводными объектами различного назначения, функционирующими в сотнях километров от береговых морей и океанов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-05-65226, 04-05-65253 и 08-05-12021 офи).

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д. Создание автоматизированной сети океанографических измерений на основе АНПА с солнечной энергетикой // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 5–12.
2. Безответных В.В., Бородин А.Е., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Аппаратно-программный комплекс для измерения угловой структуры акустических полей в задачах акустической томографии // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 2. С. 142–146.
3. Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Экспериментальные исследования особенностей применения векторных приемников в задачах томографии океана // Акуст. журнал. 2007. Т. 53, № 6. С. 786–790.
4. 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.
5. Spindel R.C., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.G., Akulich V.A., Morgunov Y.N. Acoustic Tomography for Monitoring the Sea of Japan: A Pilot Experiment // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2003. V. 28, N 2. P. 297–302.
6. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wofson M.A. Study of a Novel Range-dependent Propagation Effect with Application to the Axial Injection of Signals from the Kaneohe Source // J. Acoustic. Soc. Am. 2002. V. 111, N 2. P. 757–762.

УДК 534.222.2; 551.463.2

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ФЛУОРИМЕТРИИ

А.В. Буланов, Д.И. Боровой, В.А. Буланов, И.В. Корсков, П.Н. Попов, П.А. Салюк, А.В. Стороженко

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

О.А. Букин, А.А. Коротенко, А.Ю. Майор

Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Представлены результаты исследований структуры мелкомасштабных неоднородностей в заливе Петра Великого Японского моря с применением акустического зондирования и лазерной флуориметрии. Акустические исследования основывались на методе обратного рассеяния звука и доплеровском измерении структуры течений. Акустические методы позволяли оценить вклад достаточно крупных фазовых включений, составляющих гетерогенные неоднородности в деятельном слое моря: крупный планктон (в основном зоопланктон), рыба, твердые взвеси, пузырьки газа и др. Метод лазерной флуориметрии позволял оценить концентрацию хлорофилла и растворенного органического вещества в морской воде, что дает возможность оценить распределение фитопланктона в море. Выявлена сложная пространственная структура мелкомасштабных неоднородностей приповерхностного слоя моря и проанализированы характерные вариации глубины залегания термоклина, связанные с приливными течениями и внутренними волнами различных масштабов. Показано, что метод акустического и лазерного зондирования позволяет изучать мелкомасштабную структуру водной среды в шельфовой части моря и ее пространственно-временную изменчивость, связанную с проявлением внутренних волн, наличием пузырьков, планктона, турбулентных образований, твердых взвесей.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования характеристик рассеяния звука представляет интерес в связи с возможностью проводить оценку структуры морской среды [1–3]. Такая возможность осо-

бенно важна вблизи фронтальных зон и границ течений, когда характеристики среды изменяются на небольшом расстоянии, и поэтому никакие контактные методы не позволяют осуществлять подробную пространственную съемку