

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 побережий 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., Стрыбкин 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., Стрыбкин 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., Akulichev 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. Корсиков,
П.Н. Попов, П.А. Салюк,
А.В. Стороженко**

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

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

Институт автоматики 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 представляют 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

структурь среды вблизи таких границ [4–6]. Важным оказывается применение дистанционных методов для исследования рассеяния звука в верхнем слое морской воды в шельфовой зоне и мелководных морях. Исследования рассеяния звука в шельфовой зоне Японского моря и его заливах проводились регулярно на НИС «Импульс» и НИС «Малахит» в 1998–2006 гг.

Изучение рассеяния звука составляет основу дистанционного метода мониторинга структуры и динамики мелкомасштабных неоднородностей в деятельном слое моря. Значительный интерес представляют исследования рассеяния, обусловленные зоо- и фитопланктоном, газовыми пузырьками и рыбами, имеющими плавательный пузырь [1, 7]. На практике часто возникает необходимость получения информации не только о суммарной концентрации, но также о раздельном вкладе каждого из типов включений. Частично задачи такого типа решались с применением методов акустической спектротскопии [8–11]. Тем не менее акустические методы дают информацию о структуре только достаточно больших включений, при этом вклад мелкого фитопланктона практически не удается оценить. Ввиду исключительно высокой роли фитопланктона в структуре мелкомасштабных неоднородностей океана исследование его распределения является задачей первостепенной важности.

Решение указанной задачи могут взять на себя методы лазерной флуориметрии, которые могут дать оперативную информацию о содержании растворенного органического вещества (РОВ) в морской воде, хлорофилла «а» и некоторых других дополнительных пигментов клеток фитопланктона [12]. Это дает возможность оценить распределение фитопланктона в море и, таким образом,

позволяет заполнить белое пятно в наших знаниях о структуре мелкомасштабных неоднородностей в шельфовой зоне моря.

Экспериментальные методы и аппаратура

Акустические методы

Метод измерения коэффициентов рассеяния звука в приповерхностном слое моря основывался на остронаправленном излучении звука, приеме сигналов обратного рассеяния звука, вводе, записи и первичной обработке акустической информации на персональных компьютерах. Метод прошел многолетнюю апробацию в экспедиционных условиях, его основные черты отражены в [10, 11]. Обработка сигналов рассеяния звука с целью визуализации пространственных структур проводилась с применением специально разработанных программ SCATTER (автор Соседко С.Н. [13]) и AVIEWER (автор Демичев Д.А.). Вычисления коэффициентов рассеяния звука проводились с применением пакета MATHCAD.

Основные акустические измерения были выполнены с применением акустического профилографа течений ADP фирмы SONTEC, который позволял также изучать рассеяние звука на частоте 250 кГц. Основные характеристики ADP: три акустических преобразователя с ориентацией 25° от вертикальной оси одинаково расположены под углом 120° относительно азимута, давление акустического сигнала $P \sim 10^5$ Па, диаграмма направленности $\theta \sim 2^\circ$, длительность импульса $\tau = 1,4$ мс, диапазон профилирования 150–220 м с максимальным разрешением 1,5–2 м. ADP включает датчик температуры, давления и поддерживает последовательный коммуникационный протокол RS232.

Использовалась также дополнительная акустическая система измерения рассеяния звука на других частотах. Она включала в себя тракт излучения звука с различными частотами, пьезокерамические преобразователи, тракт приема и систему ввода и первичной обработки акустической информации. Система ввода и первичной обработки акустической информации включала в себя 14-разрядную плату ввода LA2USB с предельной частотой квантования 400 кГц, многоканальный цифровой регистратор MA-16 с предельной частотой записи 200 кГц, персональные компьютеры и специальные программы обработки и визуализации акустических сигналов. Навигационная система на базе прибора GPSMAP-130 обеспечивала привязку временного распределения данных по рассеянию на измеряемых трассах к географическим координатам.

Основные формулы для коэффициентов рассеяния звука m_v . Для описания рассеяния звука в среде с микронеоднородностями вводят понятие коэффициента рассеяния m_v [1], который в приближении однократного рассеяния (борновском приближении) определяется согласно выражению:

$$I_{bs} = I_i V m_v / r^2, \quad (1)$$

где $I_{bs} \sim P_{bs}^2$, $I_i \sim P_i^2$ – интенсивности падающего на неоднородность и рассеянного звука соответственно, при этом P_i и P_{bs} – соответственно амплитуды падающей на объем V волны и рассеянной в обратном направлении, r – расстояние до неоднородности, V – импульсный рассеивающий объем среды. Для остронаправленных излучателей, работающих в импульсном режиме, объем V можно записать в виде $V = \pi r^2 \theta^2 c t / 2$, где θ – ширина диаграммы направленности излучателя, c –

скорость звука, τ – длина импульса звука. Из формулы (1) можно получить экспериментальное значение коэффициента обратного рассеяния звука в жидкости в виде

$$m_v = \frac{2}{\pi \theta^2 c \tau} \left(\frac{P_{bs}}{P_i} \right)^2. \quad (2)$$

Часто коэффициент рассеяния звука m_v записывают в логарифмической форме – в децибелах – согласно следующей формуле:

$$S_v(\omega) = 10 \lg m_v(\omega), \quad (3)$$

при этом размерность m_v берут в м⁻¹. С помощью формул (2), (3) можно экспериментально определить частотную зависимость $m_v(\omega)$ или $S_v(\omega)$, которая позволяет установить тип рассевателей, а также некоторые их характеристики, например функцию распределения по размерам $g(R)$ или объемную концентрацию V_0 , определяемую в виде:

$$V_0 = (4\pi/3) \int_{R_{min}}^{R_{max}} R^3 g(R) dR. \quad (4)$$

Формулы (1)–(3) были положены в основу определения коэффициентов рассеяния звука на основании экспериментальных данных по измерениям амплитуд падающей на объем V волны и рассеянной в обратном направлении P_i и P_{bs} соответственно, а формула (4) является основой для оценки биомассы, распределенной в морской воде [11, 14]. Общее выражение, позволяющее по экспериментальным данным для m_v получать данные по распределению биомассы m_g в рамках двух распределений – степенного и гауссовского, имеет вид:

$$m_g^{(P,G)}(r, f) = D^{(P,G)}(f) m_v(r, f), \quad (5)$$

где коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ равен

$$D^{(P,G)}(f) = \begin{cases} \frac{4\pi\rho'}{3(4-n)} \frac{R_{max}^{4-n}}{\int_{R_{min}}^{R_{max}} \sigma_1(R, f) R^{-n} dR}, & g^{(P)} \sim R^{-n} \\ \frac{4\pi\rho'}{3} \frac{\bar{R}^3}{\sigma_1(\bar{R}, f)}, & g^{(G)} \sim e^{-[(R-\bar{R}(r))^2/\Delta^2]} \end{cases}. \quad (6)$$

Зависимость $D^{(P,G)}(f)$ детально обсуждена в [11, 14]. Предполагая, что максимальная длина особи планктона порядка сантиметров (тогда эквивалентный размер в распределении планктона по размерам имеет величину $R_{max} \sim 0,04$ см [14]), для типичной частоты $f \sim 250$ кГц можно из подробных графиков, представленных в [11, 14], получить $D^{(P)} \sim 2 \cdot 10^3$ г·м/л. Приведенная оценка в дальнейшем будет использована для оценки распределения биомассы вдоль трасс в шельфовой зоне Японского моря.

Методы лазерной флуориметрии

Метод лазерной флуориметрии морской воды основан на анализе сигнала флуоресценции, испускаемого в основном компонентами морской воды, имеющими биологическое происхождение, и инициированного достаточно сильным лазерным излучением. Использование активных источников возбуждающего излучения обеспечивает большую точность измерений и при варьировании длин волн дает дополнительную информацию об исследуемых объектах. Например, помимо концентрационных измерений возможно определять состояние фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона и его вид, а также исследовать стадии деградации растворенного органического вещества и источники его происхождения в морской воде [15, 16].

Схема реализации лазерных спектрометров может быть выполнена как в лидарном, так и в прокачиваемых вариантах. Лидары возможно применять

с борта самолетов или судов, регистрируя сигналы флуоресценции от морской поверхности, кроме этого возможны глубинные лидарные исследования до глубин порядка 100 м при использовании зеленого возбуждающего излучения и регистрации упругого обратного рассеяния [17]. Проточные флуориметры возможно использовать по ходу движения судна, кроме этого возможно проведение глубинных измерений с помощью специальных оптоволоконных приставок во время стоянки судна [18]. Существуют также коммерчески доступные погружаемые флуориметры, где в качестве источника возбуждающего излучения используются лазерные светодиоды, однако их главный недостаток заключается в том, что флуоресцентный сигнал регистрируется в одном спектральном канале, что может внести дополнительные ошибки в случае наложения сигналов разной природы (например, флуоресценции РОВ и хлорофилла «а»).

В настоящей работе при флуоресцентных измерениях морской воды использовался проточный лазерный флуориметр ЛаФ-3 с возбуждающим излучением на длине волны 532 нм, с помощью которого возможно измерение спектров лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) морской воды по ходу судна с пространственным разрешением порядка десятков метров [19]. Из спектров ЛИФ рассчитывалась интенсивность флуоресценции хлорофилла «а» ($I_{X,LA}$) и растворенного органического вещества (I_{POB}) в единицах комбинационного рассеяния воды. Кроме этого в

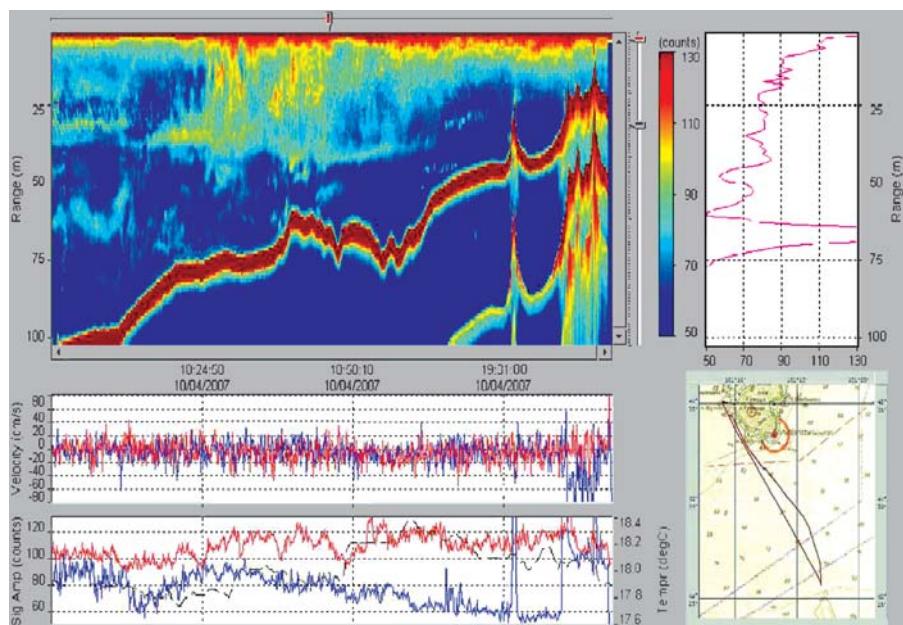


Рис. 1. Рассеяние звука на частоте 250 кГц на трассе протяженностью 20 км 04.10.2007 г. Выделено распределение коэффициента объемного рассеяния и флюктуации вертикальной компоненты течений на глубинах 3 и 32 м. Штриховой линией на нижнем рисунке представлено распределение температуры на глубине 2 м вдоль всей трассы

некоторых случаях были получены интенсивности флуоресценции дополнительных пигментов клеток фитопланктона.

Совместно с измерениями спектров флуоресценции морской воды проводилось определение температуры и солености с помощью проточного термосолинографа SBE-45 фирмы Sea-Bird (USA). Наряду с проточным термосолинографом SBE-45 использовался погружающийся зонд SBE-19-plus фирмы Sea-Bird (USA), включающий в себя датчики температуры (T), солености (S), давления (D), концентрации растворенного органического вещества (C_{POB} , датчик фирмы WetLabs), концентрации хлорофилла «а» ($C_{X_{\text{л4}}}$, датчик фирмы WetLabs) в морской воде и датчик величины фотосинтетически-активной радиации (photosynthetically active radiation, PAR, датчик фирмы LICOR) в морской воде. Максимальная глубина погружения зонда равна 350 м. Концентрация хлорофилла «а» и растворенного органического вещества (POB) восстанавливаются из измерений флуоресцен-

ции морской воды на длинах волн 680 нм и 450 нм при возбуждении излучением свето-диодов на длинах волн 420 нм и 370 нм соответственно.

Основные экспериментальные результаты

Применение акустического зондирования для выявления сезонных отличий в структуре верхнего слоя морской воды

В качестве примера акустических данных на рис. 1 представлена запись звуко-рассеивающих слоев на частоте 250 кГц, проведенная с помощью акустического додплеровского измерителя течений ADP фирмы SONTEC на трассе мыс Шульца–открытое море 04.10.2007 г. Кроме того, на рис. 1 представлены флуктуации вертикальной компоненты течений, полученные на различных глубинах (вблизи поверхности на 3 м и на большой глубине 32 м) с помощью

ADP (средний рисунок в левой колонке), распределение коэффициента объемного рассеяния на тех же глубинах (нижний рисунок), а также распределение температуры на глубине 2 м вдоль всей трассы (штриховая линия на нижнем рисунке). Справа внизу на рис. 1 представлена схема маршрута на трассе мыс Шульца–открытое море общей протяженностью около 20 км. Отчетливо видна изменчивость структуры приповерхностного слоя, характерные глубины залегания термоклина вдоль трассы, а также рассеяние, обусловленное внутренними волнами.

Для сравнения сезонной изменчивости картины рассеяния звука в приповерхностных слоях морской воды на рис. 2 представлена запись звукорассеивающих слоев на частоте 250 кГц, проведенная с помощью ADP на трассе мыс Шульца–открытое море 02.06.2008 г. На рис. 2 представлены флуктуации вертикальной компоненты течений, полученные на различных глубинах (15 м и 7 м, средний рисунок в левой колонке), распределение коэффициента объемного рассеяния на тех же глубинах (нижний рисунок), а также распределение температуры на глубине 2 м вдоль всей трассы (штриховая линия на нижнем рисунке).

Из сравнения результатов, представленных на рис. 1 и 2, видны сезонные отличия в характере рассеяния звука, что связано, в первую очередь, с изменением залегания термоклина в начале и в конце летнего сезона. На рис. 2 основное рассеяние звука происходит в приповерхностных слоях моря. Так, например, уровень рассеяния звука в перемешанном слое над термоклином (глубина 7 м) и под термоклином (глубина 15 м) различается кардинально вдоль всей трассы. Последнее проиллюстрировано на рис. 2 (нижний рисунок в левой колонке) двумя сплошными кри-

выми, представленными одновременно с горизонтальным распределением температуры на глубине 2 м. Следует также отметить превышение коэффициентов рассеяния звука в приповерхностных слоях в начале лета над таковыми в конце лета–начале осени. Это обстоятельство связано с вспышкой роста фитопланктона в начале лета и связанным с данным фактом резким ростом активности морских биосистем.

Важной характеристикой деятельного слоя моря является мелкомасштабная структура течений, включая турбулентные пульсации, которые вносят свой весомый вклад в общее рассеяние звука. Поэтому для выявления вклада в рассеяние звука от микронеоднородностей морской среды чисто биологического происхождения следует научиться выявлять относительный вклад каждого из указанных механизмов. В связи с этим был проведен большой комплекс работ по исследованию рассеянного акустического поля с характеристиками внутренних волн в мелком море одновременно с исследованиями поля течений, которые осуществлялись одним и тем же прибором – акустическим профилографом течений ADP фирмы SONTEC. На рис. 1 и рис. 2 представлен разрез вертикальной компоненты течений на различных глубинах. На среднем графике рис. 1, 2 видны вариации вертикальной компоненты скорости течений на различных глубинах – 3 м и 32 м и 7 м и 5 м. Из сравнения данных по структуре вертикальной компоненты течений и данных по рассеянию звука можно видеть, что структура течений достаточно однородна вдоль всей трассы, в то время как коэффициент рассеяния звука испытывает значительные вариации. Это позволяет сделать важный вы-

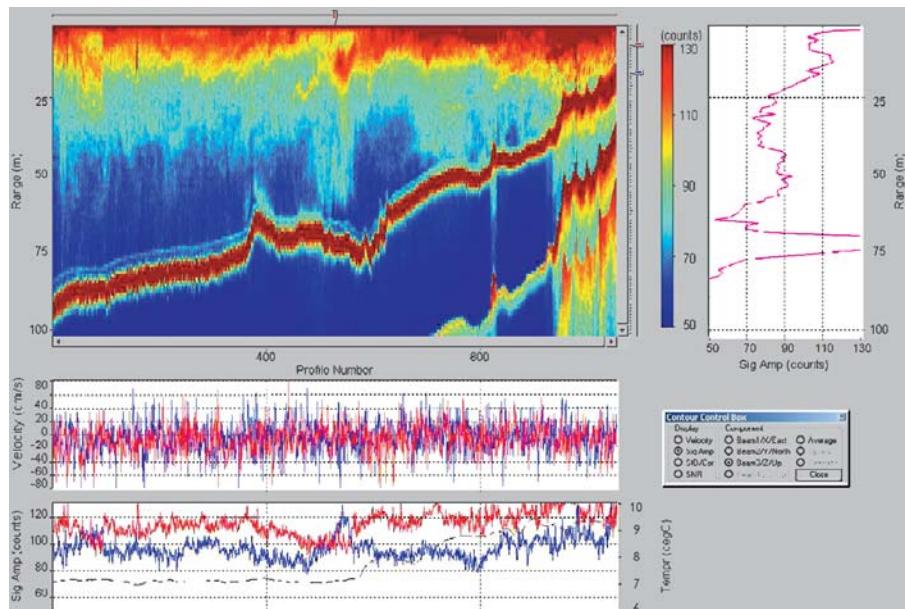


Рис. 2. Рассеяние звука на частоте 250 кГц на трассе протяженностью 20 км 02.06.2008 г. Выделено распределение коэффициента объемного рассеяния и флюктуации вертикальной компоненты течений на глубинах 7 и 15 м. Штриховой линией на нижнем рисунке представлено распределение температуры на глубине 2 м вдоль всей трассы

вод о том, что основной вклад в рассеяние звука вносят неоднородности, не связанные с турбулентностью и мелкомасштабными течениями. Таковыми являются гетерогенные микронеоднородности типа пузырьковых структур в приповерхностном слое моря и

планктон, располагающийся в области термоклина.

Следует обратить внимание на определенную корреляцию между распределением коэффициента рассеяния звука и распределением температуры. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента рассеяния

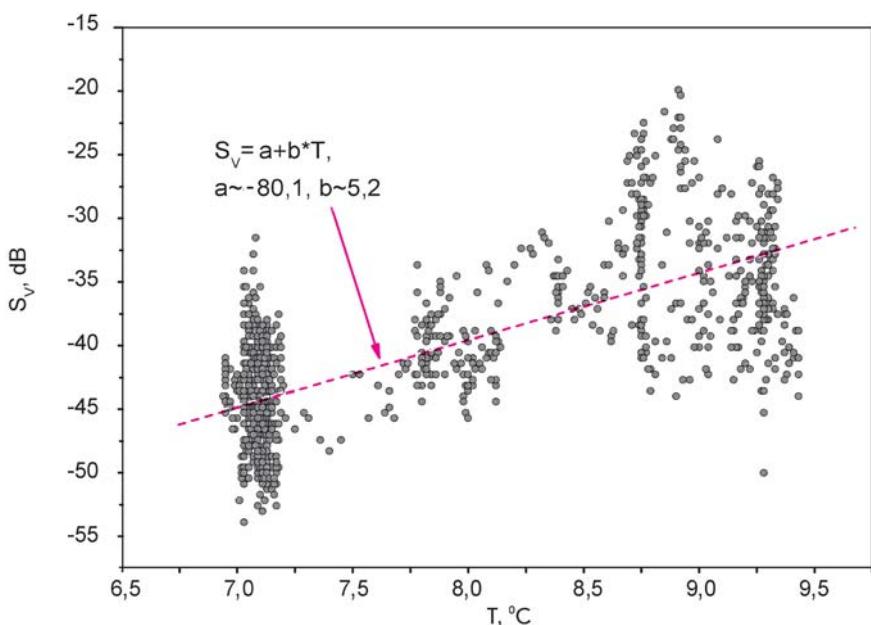


Рис. 3. Зависимость коэффициента рассеяния звука от температуры $S_v(T)$ на частоте 250 кГц вдоль трассы протяженностью 20 км 02.06.2008 г.

звука от температуры вдоль трассы. Видно, что экспериментальные точки с определенной вероятностью соответствуют линейной зависимости $S_v(T)$.

Имея данные по распределению коэффициента рассеяния звука, можно использовать их значения для оценки распределения биомассы планктона, который предположительно вносит основной вклад в рассеяние звука. Для этого следует воспользоваться формулами (2)–(6), которые позволяют вычислить распределение $m_g(r, z)$ для различных глубин вдоль всей трассы.

В общих чертах распределение $m_g(r, z)$ соответствует приведенным на рис. 2 зависимостям. Поэтому здесь мы приведем интегральную оценку биомассы вдоль трассы, проинтегрированную по глубине по формуле

$$m_g(r) = \int_0^{z_{\max}} m_g(r, z) dz, \quad (7)$$

где z_{\max} – максимальная глубина.

Результаты представлены на рис. 4 для наиболее удаленной от берега части трассы протяженностью 13 км. Видно, что имеется значительная пространственная изменчивость $m_g(r)$, которая связана с определенными гидродинамическими процессами в водной среде. Модуляция последними термоклина приводит к существенным вариациям $m_g(r)$. В качестве дальнейшего анализа на рис. 5 представлен пространственный спектр $m_g(k)$, построенный по данным для $m_g(r)$. Следует обратить внимание на достаточно ярко выраженную спектральную компоненту, длина волны которой отвечает характерным масштабам внутренних волн, распространяющихся на шельфе. Их присутствие видно также из рис. 2.

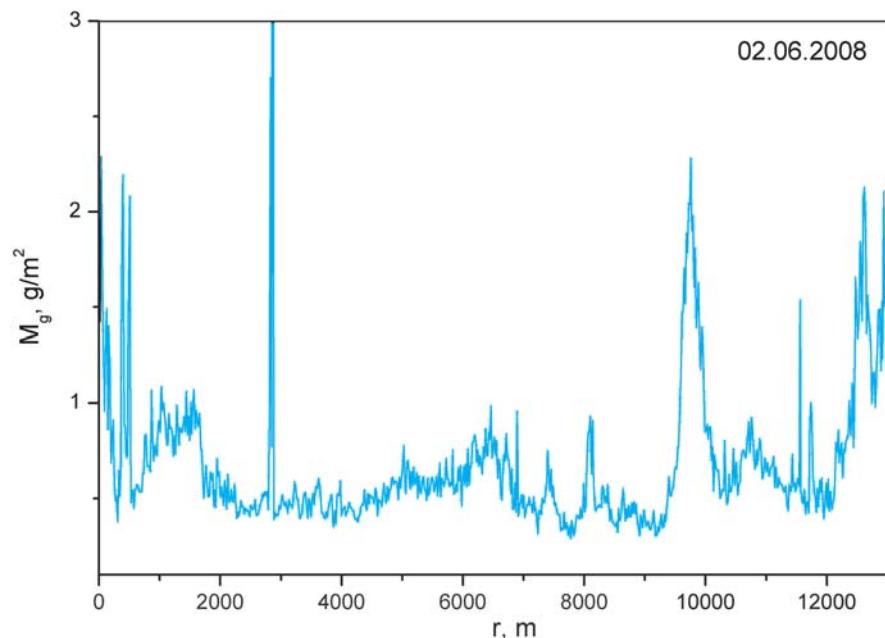


Рис. 4. Пространственная изменчивость $m_g(r)$ вдоль трассы 02.06.2008 г.

С целью выявления корреляции между акустическими и оптическими данными в летний период (7.09.2008) были проведены одновременные измерения интенсивности рассеянного звука и флуоресценции морской воды вдоль протяженной трассы мыс Шульца–Владивосток, схема которой представлена

в правом нижнем углу рис. 6. Акустические характеристики, полученные с помощью ADP (частота звука 250 кГц) вдоль трассы, представлены на рис. 6 (обозначения соответствуют рис. 1 и рис. 2). Одновременно были получены проточные измерения температуры и солености морской воды на глубине 2 м.

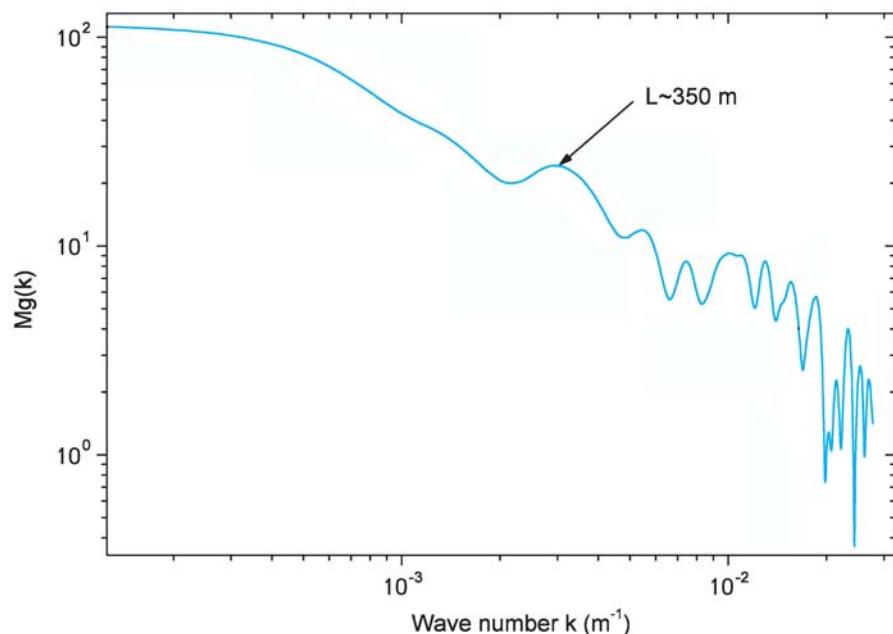


Рис. 5. Спектр $m_g(r)$ вдоль трассы 02.06.2008 г.

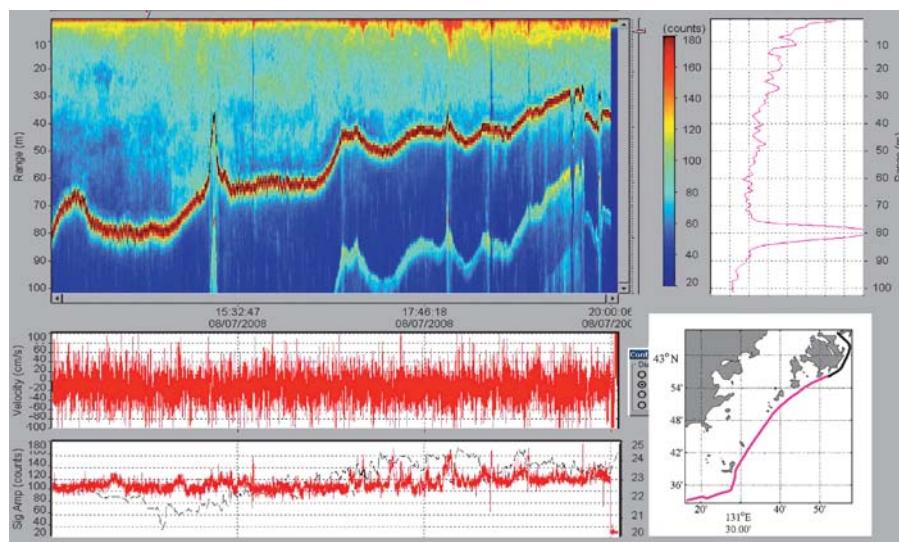


Рис. 6. Рассеяние звука на частоте 250 кГц на трассе мыс Шульца–Владивосток протяженностью около 100 км 7.09.2008 г. Выделено распределение коэффициента объемного рассеяния и флуктуации вертикальной компоненты течений на глубине 4 м. Штриховой линией на нижнем рисунке представлено распределение температуры на глубине 2 м вдоль всей трассы

Сравнительный анализ акустических и оптических измерений по маршруту мыс Шульца–Владивосток

На рис. 7 представлены результаты сравнения интенсивности флуоресценции хлорофилла «а», измеренной в прокачиваемой морской воде с глубины 2 м, и интенсивности рассеянного звука, усредненной в диапазоне глубин 4–6 м. Видно, что между анализируе-

мыми величинами наблюдается прямая зависимость, причем диаграмма рассеяния может быть разбита на два кластера, обозначенных красным и черным цветом. Отметим, что эти кластеры в соответствующих цветах представлены на схеме трассы (рис. 6), и им также отвечает Т, S-диаграмма рассеяния, представленная на рис. 8. Первый выделенный район соответствует маршруту от мыса Гамова до острова Рус-

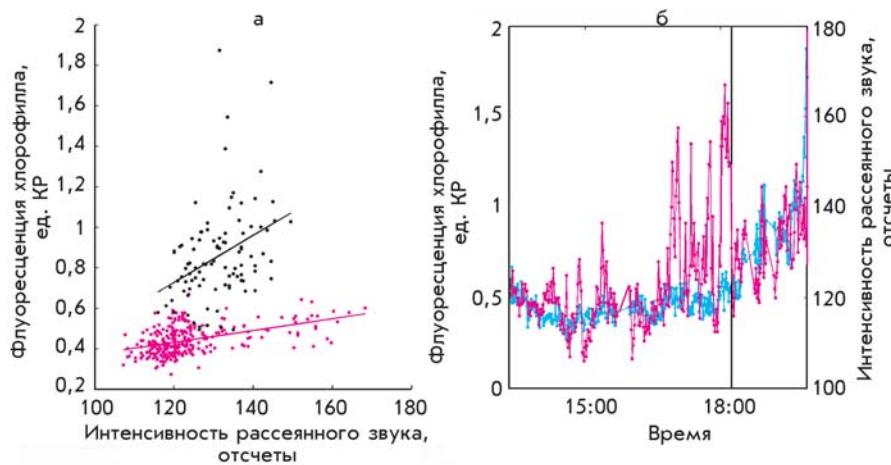


Рис. 7. Сравнение сигналов флуоресценции хлорофилла «а» (на горизонте 2 м) и рассеяния звука (усредненного в диапазоне глубин 4–6 м) вдоль трассы мыс Шульца–Владивосток (рис. 6): а – диаграмма рассеяния, б – пространственное распределение вдоль трассы

ский, второй – вдоль восточного побережья острова Русский. В обоих случаях наблюдаются значимые коэффициенты корреляции (красные точки: 0,48 (0,39–0,57), $p < 10^{-16}$ (p – вероятность получить данное значение корреляции случайным путем при данном количестве точек), черные точки: 0,39 (0,2–0,54), $p < 10^{-3}$), а свободный член линейных регрессий незначительно отличается от нуля.

Наблюдаемые прямые зависимости, скорее всего, связаны с вкладом крупных клеток фитопланктона и зоопланктона в интенсивность сигнала рассеянного звука. Здесь также важен тот факт, что свободные члены линейных регрессий не значимы, что говорит о незначимости составляющих в сигнале рассеянного звука, не связанных с деятельностью фитопланктона. При длинных пространственных разрезах в пределах нескольких часов прямая связь между содержанием фитопланктона и зоопланктона вполне логична, т.к. высокое содержание первого должно приводить к большему развитию второго. В то время как на стационарных суточных

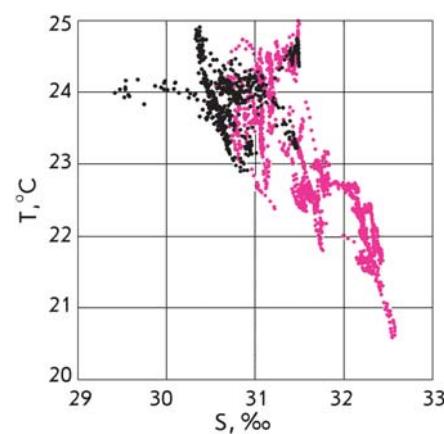


Рис. 8. Т, S-диаграмма рассеяния для данных, полученных вдоль трассы мыс Шульца–Владивосток (рис. 6). Цвета точек соответствуют цветам, которыми выделен маршрут на рис. 6

станциях должна наблюдаться обратная зависимость, т.к. здесь сказываются суточные циклы функционирования фитопланктона и зоопланктона по моделям хищник–жертва. Изменение вида линейной зависимости около 19 ч можно связать как с изменением видового состава фитопланктона (вследствие чего мог поменяться размер клеток), так и с изменением суточного режима зоопланктона.

Сравнительный анализ суточных вариаций акустических и оптических измерений

Важной характеристикой звукорассеивающих слоев являются суточные вариации их распределения по глубине. Для анализа таких вариаций на шельфе были проведены полусуточные станции на НИС «Малахит», который вставал на якоре в центре бухты Витязь Японского моря. Станции продолжались с вечера до утра следующего дня в начале августа и начале октября 2008 г.

На рис. 9 и рис. 10 представлены данные о характере временных вариаций коэффициента рассеяния звука на этих многочасовыхочных станциях.

На рис. 10 следует отметить ярко выраженные вариации коэффициента рассеяния, вызванные внутренними волнами, распределение которых в толще воды совершенно необычно – они примыкают к дну, что, вероятно, связано с дополнительным вкладом течений, захватывающих эти волны.

Распределение хлорофилла и РОВ, полученное методом лазерной флуориметрии на ночной станции в бухте Витязь 13. 08. 2008 г., представлено на рис. 11. Измерения S, T, D и концентрации хлорофилла «а» и РОВ были выполнены с по-

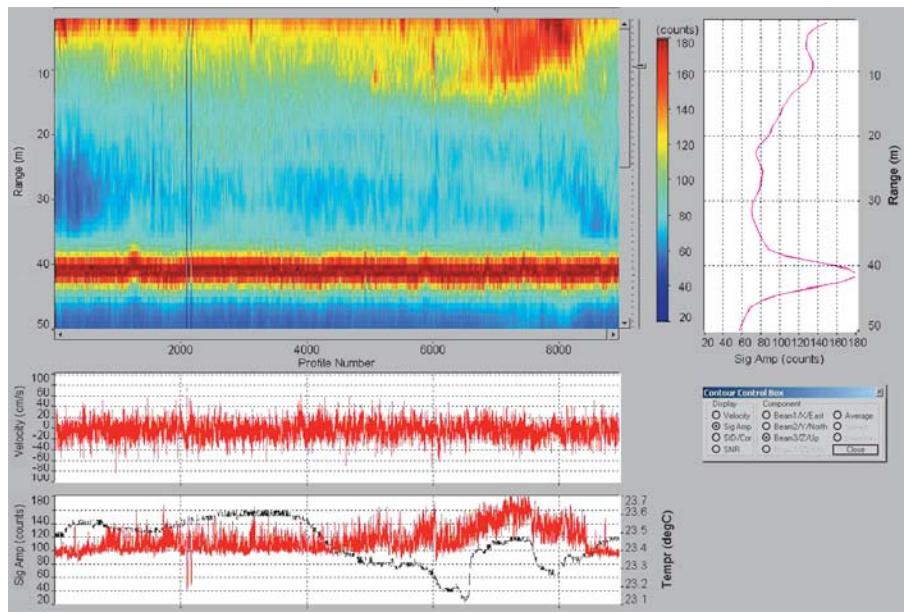


Рис. 9. Рассеяние звука на частоте 250 кГц в б. Витязь 13.08.2008 г. Выделено распределение коэффициента объемного рассеяния и флюктуации вертикальной компоненты течений на глубине 7 м. Штриховой линией на нижнем рисунке представлены вариации температуры во времени на глубине 2 м

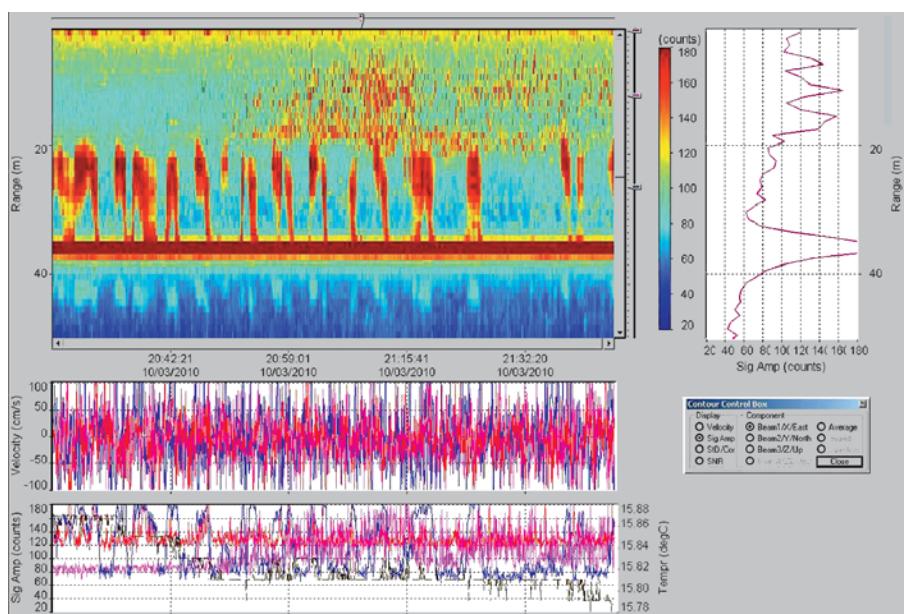


Рис. 10. Рассеяние звука на частоте 250 кГц в б. Витязь 3.10.2008 г. Выделено распределение коэффициента объемного рассеяния и флюктуации вертикальной компоненты течений на глубинах 3 и 15 м. Штриховой линией на нижнем рисунке представлены вариации температуры во времени на глубине 2 м

мощью зонда SBE-19plus (всего сделано 11 профилей). На рис. 11, 12 показаны результаты измерений с использованием зонда. Данные по плотности морской воды рассчитывались из T, S-измерений (общая стра-

тификация Т и S подобна стратификации плотности, представленной на рис. 8).

Кроме измерений с помощью погружного зонда были проведены проточными измерения температуры, солености,

флуоресценции хлорофилла «а» и РОВ в морской воде на глубине около 7 м с интервалом измерений 1 мин. На рис. 13 представлены рисунки, показывающие связь флуоресценции хлорофилла «а» и интенсивности рассеянного звука в течение около 11 ч.

По результатам, представленным на рис. 13, можно вычислить коэффициент корреляции между $I_{X_{\text{A},A}}$ и $I_{p,36}$, который составил 0,45 (нижняя оценка 0,37, верхняя 0,52), $p < 10^{-20}$, где p – вероятность получить данное значение корреляции случайнym путем при данном количестве точек.

Объяснение такой обратной зависимости следует начать с рассмотрения причин, вызывающих суточный ход флуоресценции хлорофилла «а», – это могут быть как биотические, так и абиотические факторы. Биотическими факторами суточного ритма флуоресценции хлорофилла «а» являются, во-первых, световая адаптация фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона, когда фитопланктон, изменяя содержание и состав фотосинтетических пигментов, морфологию и устройство хлоропластов, может приспосабливаться к колебаниям солнечной радиации [20]. Во-вторых, суточный ход содержания хлорофилла в клетках водорослей и, в-третьих, «выедание» водорослей зоопланктоном [21]. Абиотические факторы – длиннопериодные внутренние волны, меандрирование течений [22], суточное опускание термоклина с понижением температуры и др., т.е. чисто гидрофизические факторы.

В рассматриваемом случае фактор световой адаптации исключается ввиду отсутствия изменения освещенности в период понижения сигнала флуоресценции хлорофилла «а» (все измерения проводились ночью,

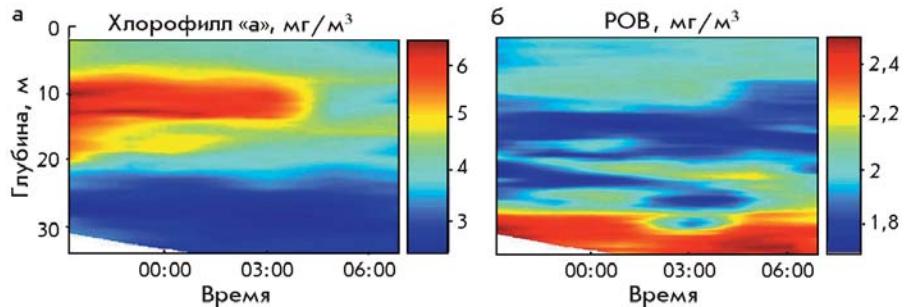


Рис. 11. Распределение хлорофилла (а) и РОВ (б) на ночной станции в б. Витязь 13.08.2008 г.

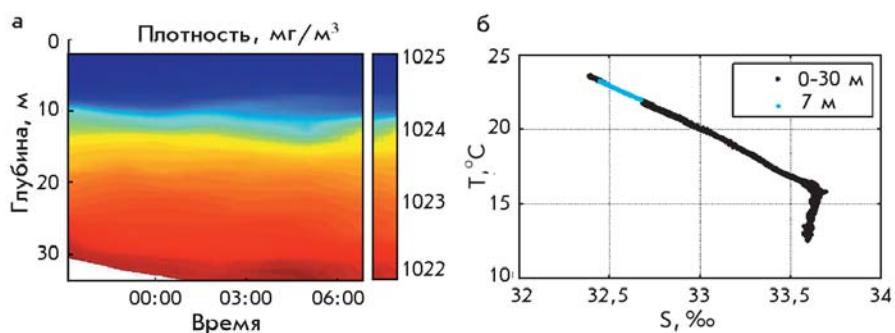


Рис. 12. а – распределение плотности морской воды на ночной станции в б. Витязь 13.08.2008 г.; б – T, S-диаграмма рассеяния во время ночной станции в б. Витязь 13.08.2008. Синими точками показаны проточные T, S-измерения на горизонте 7 м (термосолинограф SBE-45), черными точками – измерения T, S в диапазоне 0–30 м с погруженного STD-зонда SBE-19plus

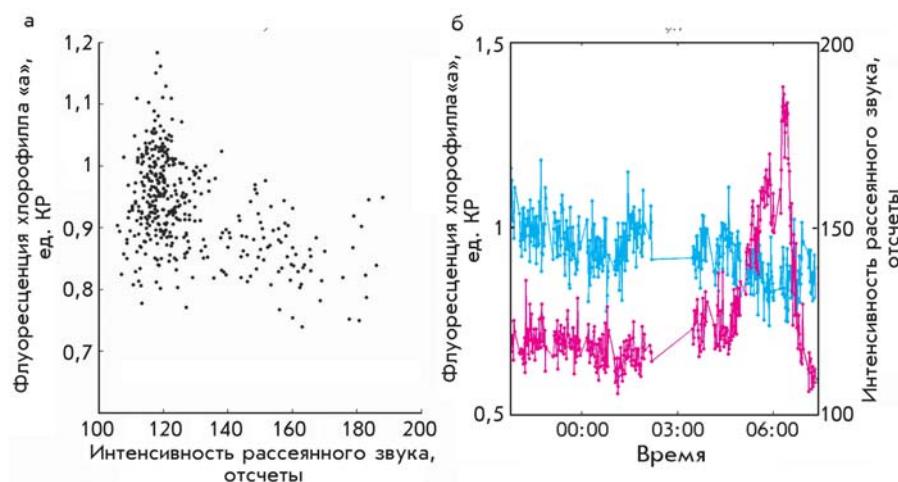


Рис. 13. Сравнение сигналов флуоресценции хлорофилла-а (на горизонте 7 м) и рассеяния звука (усредненного в диапазоне глубин 6–8 м) во время суточной станции 13.08.2008 г.: а – диаграмма рассеяния, б – временные вариации в период проведения станции

кроме этого дополнительно анализировалась освещенность морской поверхности). Из анализа распределения температуры, солености и плотности по глубине, а также T, S-диаграмм рассеяния (рис. 9), можно ис-

ключить влияние длиннопериодных внутренних волн и суточное опускание термоклина, т.к. наблюдаемые изменения были не столь значительными, чтобы привести к наблюдаемому резкому уменьшению

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

флуоресценции хлорофилла «а» (рис. 11, а). При этом следует иметь в виду, что повышение интенсивности сигнала рассеянного звука на данной станции можно связать с появлением зоопланктона, взвеси или крупных пузырьков. Взвесь отсюда можно исключить, т.к. повышение ее содержания в морской воде привело бы к резкому повышению сигнала флуоресценции РОВ, чего не наблюдалось (рис. 11, б). Следовательно, можно выделить два возможных процесса, происходящих в интервале 4–6 часов ночи: первый – приход зоопланктона и поедание им клеток фитопланктона и второй – горизонтальные течения, которые привели к перемещению клеток фитопланктона и появлению пузырьков.

Возможно также, что наблюдались оба процесса одновременно, но при этом в результате первого процесса РОВ должно, как минимум, не убывать, что можно видеть только на глубинах 0–8 м (рис. 11, б). Следует отметить, что анализ существенно затрудняет небольшое разрешение по времени между STD-зондированиями.

С помощью методов акустического зондирования показаны возможность определения параметров мелкомасштабной структуры морской среды, ее пространственная и временная изменчивость. Выявлена сложная пространственная структура мелкомасштабных неоднородностей приповерхностного слоя моря и проанализированы характерные вариации глубины залегания термоклина в различные сезоны. Показано, что применение доплеровских методов при рассеянии звука дают дополнительную информацию о структуре морской воды и ее изменчивости. Полученные результаты открывают новые возможности применения акустических методов на основе обратного рассеяния звука для мониторинга изменчивости мелкомасштабной структуры в мелководных районах Мирового океана с сильными течениями и интенсивным рыболовством.

Показано, что применение оптических методов на основе метода лазерной флуориметрии

позволяло оценить концентрацию хлорофилла и растворенного органического вещества в морской воде, что дает возможность оценить распределение фитопланктона в море.

Основной вывод из представленных результатов суточных измерений состоит в том, что совместное использование методов акустического и оптического зондирования морской толщи с одновременным анализом гидрологических параметров морской воды позволяет оперативно получать дополнительную информацию о биологических, гидрологических и физических пространственно-временных процессах.

Таким образом, 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева И.Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях // Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. С. 491–558.
2. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45, № 4. С. 437–444.
3. Андреева И.Б., Галыбин Н.Н., Тарасов Л.Л., Толкачев В.Я. Акустическая интенсивность звукорассеивающих слоев центральной Атлантики // Акуст. журн. 2000. Т. 46, № 1. С. 21–27.
4. Акуличев В.А., Булатов В.А., Корсиков И.В., Попов П.Н. Акустическое зондирование верхнего слоя морской воды в различных районах океана // X школа-семинар акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», РАО. М.: ГЕОС, 2004. С. 237–242.
5. Akulichev V.A., Bulanov V.A., Korskov I.V., Popov P.N. Acoustic Sounding of Upper Sea Water Layer at Different Areas of the World Ocean // Proc. of the 18th Int. Congr. on Acoustics. ICA 2004. Kyoto, Japan. P. 2415–2422.
6. Акуличев В.А., Булатов В.А., Корсиков И.В., Попов П.Н. Акустическое зондирование верхнего слоя морской воды в различных районах океана // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 59–71.
7. Андреева И.Б., Самоволькин В.Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.: Агропромиздат, 1986. 104 с.
8. Акуличев В.А., Булатов В.А., Кленин С.А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде // Акуст. журн. 1986. Т. 32, № 3. С. 289–295.
9. Булатов В.А. Акустический мониторинг деятельного слоя моря // Вестн. ДВО РАН. 1998. № 3. С. 19–33.
10. Булатов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. Владивосток: Дальнавака, 2001. 280 с.
11. Акуличев В.А., Булатов В.А. Исследования неоднородностей морской среды методами акустического зондирования // Дальневосточные моря России: в 4 кн. / гл. ред. акад. В.А. Акуличев. Кн. 4. Физические методы исследования / отв. ред. Г.И. Долгих. М.: Наука, 2007. С. 129–231.

12. Букин О.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н., Ильин А.А., Салюк П.А., Голик С.С., Ластовская И.А. Лазерные методы исследования океана и атмосферы // Дальневосточные моря России: в 4 кн. / гл. ред. акад. В.А. Акуличев. Кн. 4. Физические методы исследования / отв. ред. Г.И. Долгих. М.: Наука, 2007. С. 579–622.
13. Соседко С.Н. Программа SCATTER для обработки и визуализации импульсных сигналов обратного рассеяния звука // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2001. Вып. 4. С. 204–210.
14. Буланов В.А. К вопросу об оценке распределения биомассы в деятельном слое океана по данным о рассеянии звука // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1(5). С. 58–65.
15. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Palucci A., Ribezzo S. Differential Lidar Fluorescensor System Used for Phytoplankton Bloom and Sea Water Quality Monitoring in Antarctica // J. of remote sensing. 2001. V. 22, N 2/3. P. 369–384.
16. Coble P.G. Characterization of Marine and Terrestrial DOM in Seawater Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy // Marine Chemistry. 1996. V. 51. P. 325–346.
17. Bukin O.A., Mayor A.Yu., Pavlov V.A., Shevtsov B.M., Kholodkevich E.D. Measurement of the Lightscattering Layers Structure and Detection of the Dynamic Processes in the Upper Ocean Layer by Shipborne Lidar // Inter. J. of Remote Sensing. 1998. V. 19, N 4. P. 707–717.
18. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Гурин А.С., Коротенко А.А., Майор А.Ю. Погружной оптоволоконный флуориметр // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 6. С. 117–122.
19. Майор А.Ю., Букин О.А., Крикун В.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Компактный судовой флуориметр // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 283–285.
20. Parsons T., Takahashi M. Biological Oceanographic Processes. L.: Pergamon Press, 1973. 186 р.
21. Карабашев Г.С., Соловьев А.Н. Закономерности пространственно-временной изменчивости интенсивности флуоресценции пигментов в клетках живого фитопланктона // Тр. ИОАН. 1975. Т. 102. С. 89–93.
22. Карабашев Г.С. Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 200 с.

