

АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРСКОЙ ВОДЫ В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ ОКЕАНА

В.А. Акуличев, В.А. Буланов,
И.В. Корсков, П.Н. Попов

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

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКИ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ОКЕАНА

Характеристики звукорассеивающих слоев

Предметом обсуждения в работе является применение акустических методов для осуществления мониторинга мелкомасштабных неоднородностей в деятельном слое моря. Вначале кратко рассмотрим основные акустические характеристики звукорассеивающих слоев (ЗРС), которые могут быть положены в основу акустического мониторинга.

Выше частоты звука порядка 1 кГц основное рассеяние имеет биологическое происхождение [1,2], и значительная часть этого рассеяния связана с зоопланктоном. Более подробно иерархия различных рассеивателей по частотам звука выглядит следующим образом: ниже 10 кГц основной вклад в рассеяние звука дают рыбы, причем ниже 3–5 кГц коэффициент объемного рассеяния резко уменьшается; на частотах от 10 кГц до сотен кГц рассеяние связано с зоопланктоном; а на частотах, приближающихся к 1 мГц и выше 1 мГц, основную роль начинают играть фитопланктон и взвеси различного происхождения. Зоопланктон обычно располагается в областях с максимальными градиентами температуры (или

плотности), т. е., как правило, в области сезонного термоклина. При этом он имеет толщину слоев от нескольких метров до нескольких десятков метров.

Характерной чертой поведения зоопланктона является его способность к суточным миграциям по глубине – смена места расположения – ночью ближе к поверхности до 20–100 м, а днем – опускание до значительных глубин 300–500 м. Способность к суточным миграциям по глубине фитопланктона дискуссионна, и не существует достаточно достоверной информации о характерных глубинах суточной миграции фитопланктона. В первую очередь является неопределенным механизм транспортировки фитопланктона по вертикали. Существуют представления о возможной роли газовых пузырьков как своеобразных движителей фитопланктона под действием обычной архимедовой силы [3]. Однако единого мнения об универсальности такого сосуществования газовых пузырьков с фитопланктоном, а также о механизмах и деталях суточных вариаций до сих пор не существует.

Среди различных видов зоопланктона преобладают мелкие ракообразные с размерами от 10^{-2} см до 1–10 см. Наиболее популярной моделью таких организмов является модель короткого цилиндра длиной l и радиусом R с упругой, жесткой оболочкой и жидким заполнением

[4], а также модель слабоизогнутого цилиндра [5,6]. При этом считается, что толщина оболочки $h \ll R$. Характерные физические характеристики зоопланктона таковы: $l/2R \sim 5$, $h/R \sim 0,01–0,02$, отношение сжимаемостей оболочки и воды $b_1/b \sim 0,05$, коэффициент Пуассона оболочки $n_1 \sim 0,3–0,35$, отношение плотностей $(r_1-r)/r \sim 0,06$; $(r_2-r)/r \sim 0,03–0,05$; $c_2/c \sim 0,01–0,03$, где индекс 1 – относится к оболочке, а индекс 2 – к жидкому заполнению.

Применение параметрических акустических излучателей

Обычно для задач изучения рассеяния звука в океане применяют одночастотные направленные линейные излучатели, которые обладают достаточно высокой мощностью. Вместе с тем часто для мониторинга ЗРС требуется определение характеристик рассеяния звука на различных частотах, что составляет задачу акустической спектроскопии среды. И здесь на помощь приходят широкополосные параметрические излучатели.

Параметрические акустические излучатели (ПИ) являются типичными нелинейными устройствами, основанными на нелинейных эффектах взаимодействующих пучков акустических волн в нелинейной среде. Основная идея заключается в том, что при осуществлении так называемого параметрического взаимодействия первичных мощных высокочастотных акустических волн с частотами ω_1 и ω_2 (которые называют волнами накачки) и вследствие нелинейности среды, в которой распространяется акустический пучок, происходит эффективное нарастание амплитуды волны на других частотах звука – на комбинационных частотах ω^\pm , т. е. на частотах, составляющих комбинацию первичных частот $\omega^\pm = n\omega_1 \pm m\omega_2$, где $n, m = 1, 2, 3 \dots$ – целые числа [7]. Из всего набора комбинационных частот основной

практический интерес представляют волны наименьшей разностной частоты (ВРЧ), $\omega = \omega_1 - \omega_2$, поскольку коэффициент затухания звука резко уменьшается с уменьшением частоты и поэтому генерируемая в среде акустическая волна низкой частоты ω может распространяться на большие расстояния [7–9]. При этом достаточно весьма слабого относительного изменения частот ω_1 или ω_2 , чтобы произошло большое изменение разностной частоты ω . Таким образом, изменяя в небольших пределах частоты накачки можно изменять частоту зондируемого сигнала ω в весьма широких пределах. Иными словами, можно осуществлять акустическую спектроскопию с применением нелинейно генерируемой волны разностной частоты, причем последняя перестраивается в весьма широких пределах [4–8].

Акустический мониторинг резонансных включений в приповерхностном слое моря

Кратко суть применения метода рассеяния звука для мониторинга резонансных включений в океане заключается в следующем [9]. Обычные газо-

вые пузырьки и плавательные пузырьки рыб являются типичными осцилляторами, т. е. колебательными системами с резонансными частотами, изменяющимися от сотен герц до десятков и даже сотен килогерц. При этом они характеризуются достаточно высокой добротностью Q спектральной линии на резонансе, которую обычно оценивают в среднем величиной $Q \sim 4-8$, хотя в действительности Q зависит от частоты. На резонансе сечение рассеяния звука при типичных функциях распределения по размерам $g(R)$ носит резко избирательный характер, связанный с характерным размером резонансных включений. Поэтому, изменяя частоту, можно определить концентрацию резонансных включений, откликающихся на воздействие звука [9].

Рассеивающие свойства среды обычно характеризуются коэффициентом объемного рассеяния m_v , который экспериментально определяется с помощью частотно зависимых амплитуд рассеянного и падающего на среду $P_i(\omega)$ звука в виде

$$m_v^{(exp)}(\omega, \tau) = \frac{2}{\pi \theta^2 c \tau} \left(\frac{P_s(\omega)}{P_i(\omega)} \right)^2 \equiv \frac{2}{\pi \theta^2 c} W(\omega, \tau), \tag{1}$$

$$W(\omega, \tau) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{P_s(\omega)}{P_i(\omega)} \right)^2,$$

Здесь τ – длительность импульса звука, c – скорость звука, θ – угловая ширина характеристики направленности излучателя. В отношении резонансных включений теоретически определенное выражение для коэффициента рассеяния звука имеет следующий вид [9–11]:

$$m_v(\omega) = \pi R_w^3 g_w Q_w / 2, \tag{2}$$

где $g_w = g(R_w)$ – функция распределения резонансных включений по размерам R , так что индекс « w » отмечает резонанс-

ные пузырьки, при этом резонансный радиус R_w и функция распределения, $g(R_w)$, связанные с количеством пузырей в единице объема среды n , определяются формулами

$$n = \int_{R_{min}}^{R_{max}} g(R_w) dR, \tag{3}$$

$$R_w = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega,$$

где γ – постоянная адиабаты, для воздуха $\gamma \approx 1,4$, P_0 – гидростатическое давление, ρ – плотность воды.

Функции распределения зоопланктона по размерам

Количественно связь размеров и концентрации зоопланктона при $l < 1$ см была впервые получена В.Б. Цейтлиным [12] для организмов, обитающих в тропических биологически бедных и биологически богатых районах океана, которые выражаются формулой

$$dN/dW = AW^{-2},$$

где N – количество экземпляров в 1 м^3 , W – вес, как правило, в миллиграммах, A – константа, характеризующая обилие жизни в районе. В верхнем 100-метровом слое воды в биологически богатых районах $A \sim 30 \text{ мг/м}^3$, а в биологически бедных A в 50–100 раз меньше. При увеличении глубины на несколько сотен метров гидродинамические характеристики уменьшаются в 1,5–2 раза. Зависимость веса W от размера l имеет вид степенной функции

$$W = Bl^m, \quad B \approx 17,5; \quad m \approx 2,7,$$

где l выражается в сантиметрах. Таким образом, справедлива степенная функция распределения планктона по размерам вида

$$\frac{dN}{dl} = A_l l^{-n}, \quad A_l \approx 4,7; \quad n \approx 3,7. \tag{4}$$

В случае больших размеров зоопланктона при $l > 1$ см функция распределения имеет вид функции с максимумом при некотором размере, который может быть ярко выраженным или несколько «размазан» в зависимости от вида зоопланктона. В настоящее время наиболее популярными являются три вида функций распределения планктона по размерам: нормальное распределение, Рэлеевское и распределение Райса. Для типичного океанического зоопланктона с размерами от 0,8–1 см (копеподы, амфиподы) до 5–9 см (эфваузиды, декаподы) обычно имеются следующая закономерность распределения по разме-

рам: с увеличением размера распределение становится уже.

Характеристики нерезонансного рассеяния звука рыбными скоплениями и зоопланктоном

Коэффициент объемного нерезонансного рассеяния звука m_v скоплением рыбы или планктона определяется обычным выражением, учитывающим функцию распределения по размерам в виде:

$$m_v = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \sigma(l) dN(l), \quad (5)$$

где размерность сечения рассеяния σ одиночным организмом обычно задают в m^2 , и тогда размерность коэффициента m_v определяется как m^{-1} . Для мелкой рыбы и планктона с размером меньше длины волны звука $kl < 1$ зависимость $\sigma(\omega, l)$ имеет вид

$$\sigma(l, \omega) = \sigma_1(\omega)(l/l_1)^6.$$

Обычно выбирают $l_1 = 1$ см и тогда для нерезонансной (рэлеевской) области рассеяния получают для коэффициента объемного рассеяния звука m_v следующее выражение:

$$m_v(\omega) \approx 1,4\sigma_1(\omega)l_{\max}^m \approx Df^4l_{\max}^m, \quad (6)$$

$$m \approx 3,3, \quad D \approx 10^{-28},$$

где l_{\max} – максимальный размер нерезонирующей рыбы или зоопланктона.

В приведенных выше формулах не учитываются эффекты дифракции, существенные при больших размерах объектов. В конце 1980-х годов появился ряд моделей, которые позволяют по достаточно простым формулам учесть также дифракционные эффекты при рассеянии на довольно больших и сложных по форме объектах, например, на слабо изогнутых цилиндрах конечной длины. В этом случае удается оценить ко-

эффициент рассеяния не только рыбами и планктоном малого размера (меньше длины волны звука), но и большими рыбами и зоопланктоном, наи-

более сильно рассеивающим звук. Одной из популярных моделей является модель Стентона [4,5]. Основные формулы имеют следующий вид:

$$\sigma_1(\omega, R) = \frac{1}{4} \frac{L_a^2 R^2 (kR)^4 H^2 G \zeta^2}{1 + \frac{L_a^2 R^2 (kR)^4 H^2 \zeta^2}{3L_a R^2 V^2 F}}, \quad H = \frac{1}{2} \left(1 + 3L_a^2 R^2 \sin(1/L_a^2 R^2) \right), \quad (7)$$

$$V = \left(\frac{\rho' c'}{\rho c} - 1 \right) / \left(\frac{\rho' c'}{\rho c} + 1 \right), \quad \zeta = \left(1 - \frac{\rho' c'^2}{\rho c^2} \right) / \frac{2\rho' c'^2}{\rho c^2} + \left(1 - \frac{\rho'}{\rho} \right) / \left(1 + \frac{\rho'}{\rho} \right), \quad (8)$$

$$F \approx 5(kR)^{0.4}, \quad G \approx 1 - 0,87 \exp(-2,5(kR-2)^2), \quad L_a \gg 10,5, \quad (9)$$

где ρ – плотность, C – скорость звука, $k = \omega / c$ – волновое число, ω – циклическая частота звука, R – радиус цилиндрического объекта.

Итак, на высоких частотах основное рассеяние звука связано с наличием пузырьков в приповерхностном слое, а в толще деятельного слоя моря оно имеет биологическое происхождение и значительная часть его связана с распределением планктона в морской воде [1, 2]. Планктон обычно располагается в областях с максимальными градиентами температуры, т. е., как правило, в области сезонного термоклина. Это обстоятельство для рассеяния звука имеет большое значение,

т. к. позволяет по аномальному рассеянию звука на планктоне и других микронеоднородностях, локализованных вблизи термоклина, получать информацию о различных крупномасштабных нестационарных гидрофизических процессах в море – внутренних волнах, течениях и крупномасштабной турбулентности. Ниже в работе представлены типичные вариации коэффициента объемного рассеяния звука вдоль ряда трасс, выполненных в Японском, Восточно-Китайском, Южно-Китайском морях, Индийском океане, в Красном и Средиземном морях, в Атлантическом океане и в Северном и Балтийском морях.

Коэффициент объемного рассеяния звука на микронеоднородностях с типичными функциями распределения в жидкости

Коэффициент объемного рассеяния звука m_v при типичных функциях распределения

по размерам – степенной и гауссовской – определяется выражением вида [10,13,14]:

$$m_v(\omega, \vartheta) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma(\omega, R) g(R) dR \approx \begin{cases} A(\omega) \bar{R}^3 \omega^4 U \psi^2(\vartheta), & g \sim \exp \left[-\frac{(R - \bar{R})^2}{\Delta^2} \right], \\ B(\omega) R_{\max}^3 \omega^4 U \psi^2(\vartheta), & g \sim R^{-n} \end{cases} \quad (10)$$

где $A(\omega)$ и $B(\omega)$ – слабые функции частоты, связанные в основном с акустическими характеристиками фазовых включе-

ний (ФВ) и типом функции распределения $g(R)$, U – объемная концентрация ФВ, $\psi(\vartheta)$ – индикатриса рассеяния, которая

важна для рассеивателей с размерами больше длины волны звука. Измеряя обратное рассеяние $m_v(\omega, \vartheta)$ на частотах ω_1 и ω_2 , можно определить либо средний размер R планктона при нормальном законе распределения по размерам, либо максимальный размер R_{max} при степенном законе, а также U . Поскольку $A(\omega)$ и $B(\omega)$ по порядку величины равны, то значение U при нормальном законе распределения будет заметно меньше соответствующего значения U , определенного при степенном законе $g(R)$, т. к. обычно $R \ll R_{max}$. По приведенным зависимостям коэффициентов рассеяния на планктоне можно заключить, что расстояние обнаружения планктона зависит от их размера и частоты звука. Планктон большого размера лучше всего обнаруживать на низких частотах. Что касается мелкого планктона, его лучше всего пытаться регистрировать на более высоких частотах. Для типичных размеров частиц мелкого планктона меньше 1,5–3 мм в диаметре следует применять высокие частоты больше 100–200 кГц, в то время как большой планктон может обнаруживаться также с применением низких частот лоцируемого сигнала меньше 100 кГц.

Сила звукорассеивающего слоя

Наряду с коэффициентом рассеяния для характеристики звукорассеивающего слоя (ЗРС) часто вводят силу слоя по формуле

$$S_l(r) = 10 \lg \left[\int_0^{h_{max}} m_v(r, h) dh \right], \quad (11)$$

где h_{max} – максимальная толщина слоя, например, до дна или до границы зондирования (зачастую h_{max} выбирают равной толщине верхней части деятельного слоя океана $h_{max} = 200$ м), $m_v(r, h)$ – коэффициент объемного рассеяния $m_v(r, h)$.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА В ВЕРХНЕМ ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ ОКЕАНА

Основные параметры аппаратуры для акустического зондирования

Для проведения исследований рассеяния звука в море использовались гидролокаторы с различными частотами зондирования, как правило, порядка сотен килогерц. Система измерения рассеяния на частоте 100 кГц использовала акустическую антенну судового эхолота и два параллельных тракта приема сигналов рассеяния (на накачке и на разностной частоте) на базе разработанных в лаборатории гидрофизики аппаратурных средств, подключенных к антенне эхолота. После усиления сигналы детектировались и вводились в компьютер через 12-разрядную плату ввода ADS1B с максимальной частотой квантования 200 кГц. Звуковое давление на оси антенны в режиме излучения составляло около 100 кПа·м, чувствительность в режиме приема около 500 мкВ/Па, ширина диаграммы направленности антенны 10°.

Исследование рассеяния звука в Японском море

В Японском море были проведены исследования рассеяния звука на мелкомасштабных структурах различного происхождения, в т. ч. на объектах биологического происхождения: планктон (зоо- и фитопланктон), рыбные скопления. Благодаря мощному рассеянию на указанных объектах удалось легко визуализировать различную структуру водных масс в море и отследить положение фронтов в пространстве. Так, на рис. 1 представлены результаты исследования рассеяния

звука в Японском море в зимний период при переходе через фронтальный раздел теплых и холодных водных масс. Стрелкой отмечено положение фронтального раздела, отделяющего субарктические водные массы от субтропических. Видно, что в теплых водах формируется глубоководный ЗРС, в то время как в холодных основное рассеяние звука обусловлено приповерхностными слоями с глубиной залегания менее 50–60 м.

Исследования в Японском море проходили также в весенний период при возвращении парусника «Надежда» из кругосветной экспедиции весной 2004 г. Были получены данные по пространственному распределению коэффициента рассеяния звука вдоль трассы Пусан–Владивосток. На расстоянии примерно 500 км от Пусана происходит перестройка рассеяния звука. Именно в этом месте находится фронтальная зона раздела теплых водных масс, заходящих через Цусимский пролив в Японское море (одна из ветвей Куроисио), и холодных вод, спускающихся вдоль континентального дальневосточного побережья на юг. На рис. 2 представлена сила звукорассеивающего слоя вдоль указанной трассы. Здесь по величине силы слоя хорошо различается различная структура вод. Фронтальная зона и шельфовые зоны указаны стрелочками. Кругом обведены сбойные или ошибочные данные. Следует отметить, что очень высокие значения силы слоя на шельфе также являются завышенными. Это связано с ошибочным включением в расчеты коэффициента отражения от дна, а не коэффициента объемного рассеяния звука (толщина слоя рассматривалась везде одинаковой и равной 200 м в соответствии с формулой (11). Видно, что переход через фронт раздела водных масс субарктичес-

кого и субтропического происхождения, на рис. 2 это удается хорошо отследить.

Следует отметить, что на рис. 2 отчетливо видна суточная миграция ЗРС, идет всплытие слоев при переходе к ночи. Обращает на себя внимание более высокая контрастность суточных вариаций ЗРС в теплых водах (южнее фронтальной зоны) в отличие от вариаций в холодных водах. Характерно, что в целом сила слоя в теплых водах примерно на 5–6 дБ оказывается выше по сравнению с силой слоя в холодных водах. Последнее указывает на более высокую биопродуктивность теплых вод, в которых биологические объекты, как правило, располагаются более равномерно по глубине и глубже по сравнению с холодными водами (см. рис. 2).

Исследования рассеяния звука в Восточно-Китайском море

При проведении исследований по акустическому зондированию в Восточно-Китайском море следует принимать во внимание мелководность этого моря, что проявляется в структуре звукорассеивающих слоев. На рис. 3 представлена типичная структура ЗРС в Восточно-Китайском море.

Из рис. 3 видно, что наблюдается мощное приповерхностное рассеяние звука, связанное, скорее всего, с наличием большой концентрации планктона. Картина рассеяния звука на рис. 3 соответствует зимней гидрологии, которая характеризуется инверсией температуры, – на поверхности холодно, а в толще температура увеличивается ко дну. Картина ЗРС отвечает двум типам рассеяния – приповерхностному и донному, которые при этом обнаруживают вариации типа длинных внутренних волн.

Нужно отметить, что Восточно-Китайское море в отношении

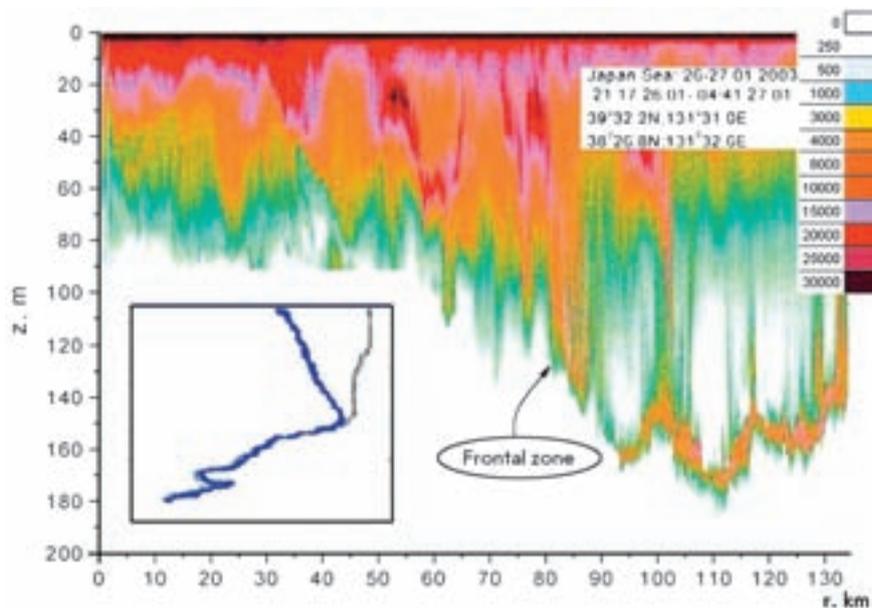


Рис. 1. Рассеяние звука при переходе через фронт в Японском море (интенсивность рассеяния звука представлена в относительных единицах). Здесь же дан вертикальный профиль температуры (черный) и скорости звука (синий) для холодных вод к северу от фронтальной зоны в Японском море

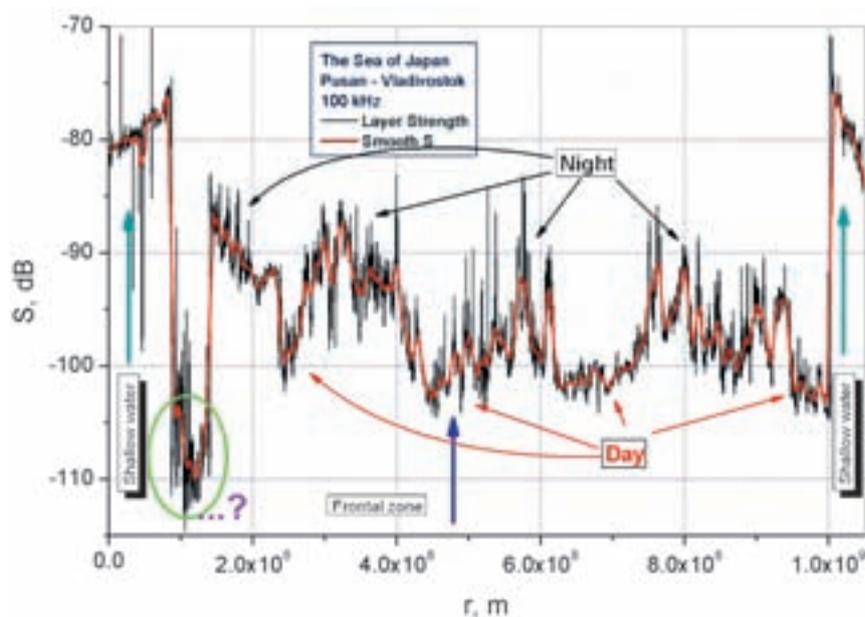


Рис. 2. Пространственное распределение силы звукорассеивающего слоя на трассе Пусан–Владивосток в Японском море (весна 2004 г.)

рассеяния звука в зимний период оказалось достаточно однородным по структуре, несущественно отличаясь в деталях. Практически пример рассеяния звука, приведенный на рис. 3, дает полное представление о характере рассеяния звука в Восточно-Китайском море. Необходимо лишь еще раз указать на значительную динамику, связанную с наличием течений различного происхождения,

наиболее ярко проявляющихся около дна моря.

Исследования рассеяния звука в Индийском океане

В северной части Индийского океана были проведены исследования вдоль трасс, располагающихся в южной части Бенгальского залива и в Аравийском море, соответственно. Удалось зарегистрировать су-

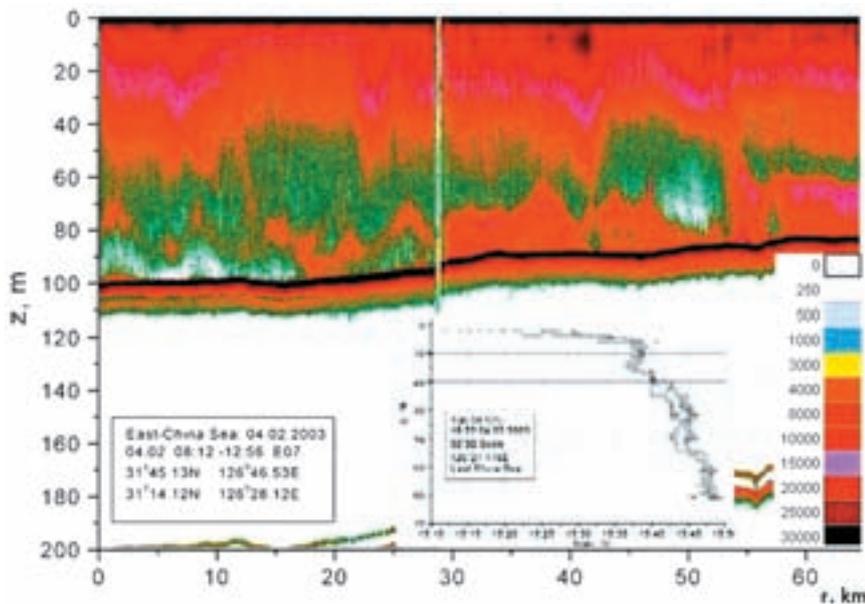


Рис. 3. Звукорассеивающие слои в Восточно-Китайском море (интенсивность рассеяния звука представлена в относительных единицах)

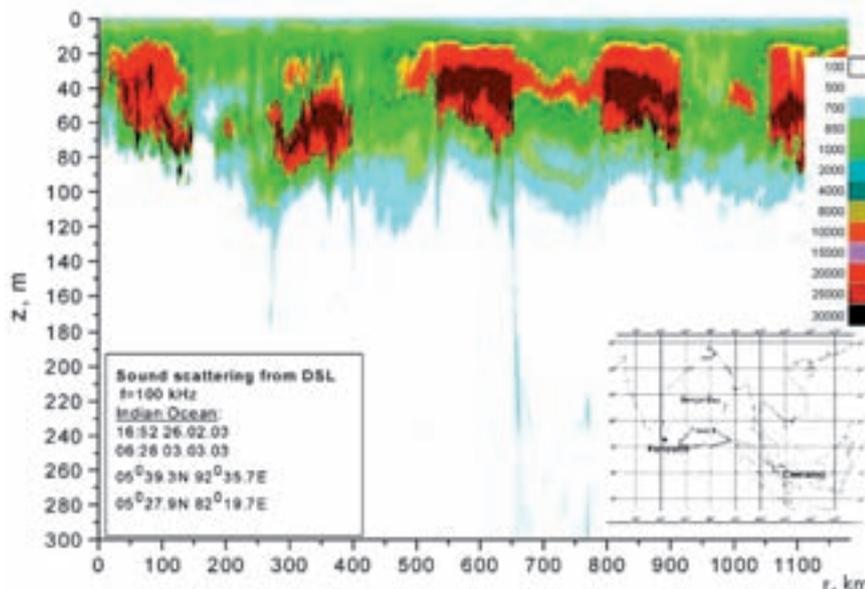


Рис. 4. Распределение коэффициента рассеяния звука вдоль трассы в Бенгальском заливе Индийского океана (коэффициент рассеяния звука представлен в относительных единицах)

точные вариации ЗРС, а также крупномасштабные изменения расположения термоклина вдоль длинных трасс протяженностью более 1000 км. Все это представлено на рис. 4, 5 для распределения коэффициента рассеяния звука.

На рис. 5 представлено распределение силы слоя вдоль трассы в Аравийском море. Видно, что на протяжении всей трассы идет постепенное снижение силы слоя и его среднее уменьшение составило 5,6 дБ.

Последнее указывает на более высокую биопродуктивность моря в южной части по сравнению с водами, располагающимися севернее. Из рис. 5 видны суточные миграции ЗРС, ярко выделены положения ЗРС в темное время суток. Именно в этот период многократно усиливается рассеяние звука в приповерхностных слоях, природу которого обычно объясняют всплыванием планктона из глубинных слоев и происходящим таким образом уве-

личением объемной концентрации планктона. Виден глубоководный ЗРС, который залегает на глубине около 300–400 м.

На рис. 6 представлены временные вариации тонкой структуры звукорассеивающих слоев на одной из станций в Аравийском море, когда судно находилось в дрейфе (скорость дрейфа была нулевой). Отчетливо видна слоистая структура ЗРС, которая отождествляется с тонкой структурой гидрофизических полей. Видно, что вблизи глубины 100 м имеются характерные вариации термоклина с периодом порядка 10 мин, обусловленные внутренними волнами.

Такая же картина видна и в спектральной области (рис. 7), где характерный пространственный масштаб указан около каждого спектрального пика. В спектре присутствует масштаб 210 км, характеризующий расстояние, на котором наблюдаются суточные вариации ЗРС, а также его 3-я и 5-я гармоники, отвечающие масштабам 71 и 44 км. Далее привлекает внимание пик λ_n с масштабом 3,2 км, который характеризует картину распределения звукорассеивающих слоев, обусловленную модуляцией их внутренних волн с указанной выше величиной длины волны 3,2 км.

Исследования рассеяния звука в Красном море

Весьма интересным объектом для океанологических исследований являются закрытые моря, ярким представителем которых является Красное море. Здесь наблюдаются мощные суточные вариации ЗРС, которые располагаются на фоне крупномасштабных изменений среднего их залегания (расположение термоклина) вдоль трассы протяженностью около 1700 км. Указанная трасса представлена на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что величина коэффициента объемного

рассеяния постепенно в среднем понижается при продвижении на север. Глубоководный ЗРС здесь, как и в Индийском океане, залегает на глубине около 300–400 м.

На рис. 9 представлена сила слоя ЗРС в Красном море. Подобно коэффициенту рассеяния $m_v(r, h)$ видны суточные вариации силы слоя, а также постепенное понижение его амплитудного значения при продвижении на север.

В представленных выше результатах наблюдается существенная пространственная и временная зависимость коэффициента рассеяния звука и силы слоя, которая, как и в Аравийском море, имеет тенденцию постепенного их уменьшения при переходе из южной части в северную часть моря.

Исследования рассеяния звука около подводных гор, водоразделов и в проливах

Проливы, водоразделы и выход на шельф вблизи подводных гор представляют особый интерес в связи с наличием сложной гидродинамики течений, сильной турбулентности и сильной временной и пространственной изменчивости гидрофизических характеристик деятельного слоя моря. Метод зондирования на основе рассеяния звука представляет собой мощный инструмент для изучения структуры в указанных областях моря. Рассмотрим несколько типичных примеров. Гибралтар – пролив, в котором мощные противоположно направленные течения атлантической и средиземноморской воды создают уникальные возможности для развития мощной турбулентности. На рис. 10 представлен акустический разрез на выходе из Гибралтара и показано формирование океанической структуры. Вблизи дна со стороны Средиземного моря хорошо различается под-

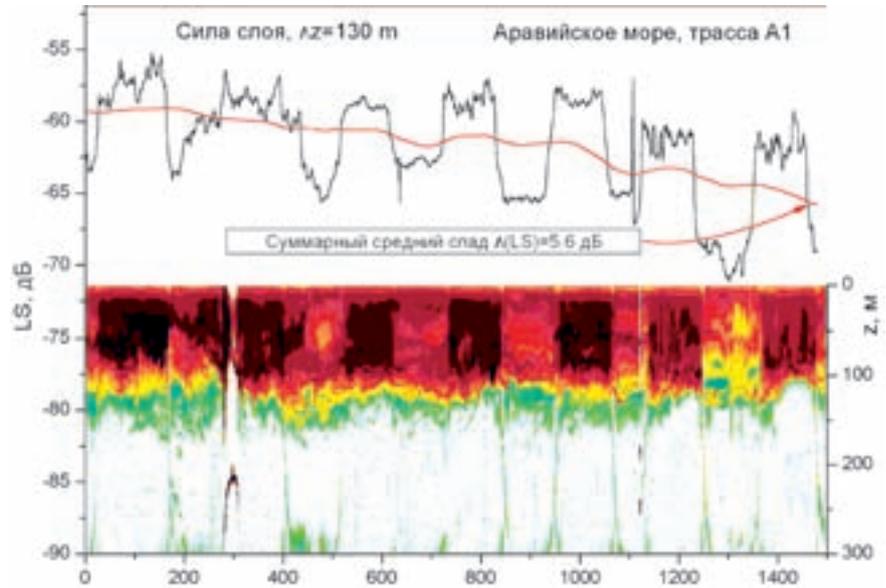


Рис. 5. Распределение коэффициента рассеяния звука вдоль трассы в Аравийском море (коэффициент рассеяния звука представлен в относительных единицах)

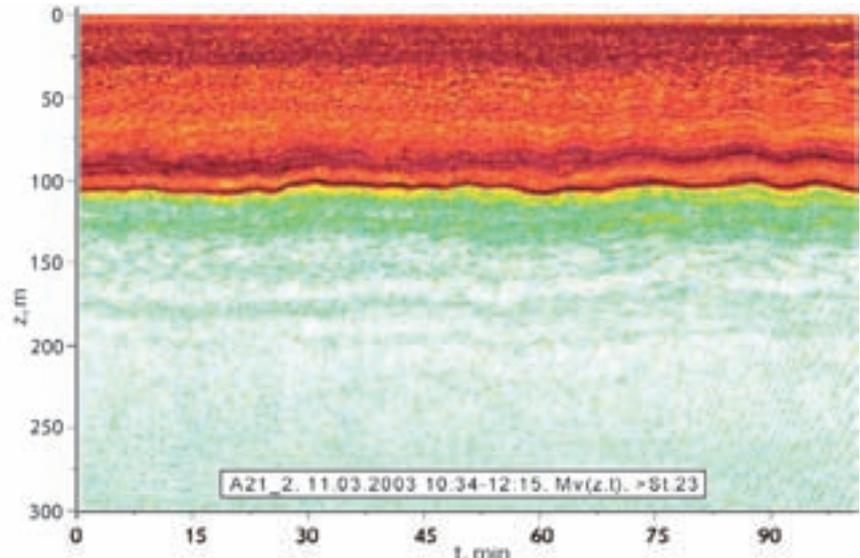


Рис. 6. Тонкая структура ЗРС на одной из станций в Аравийском море

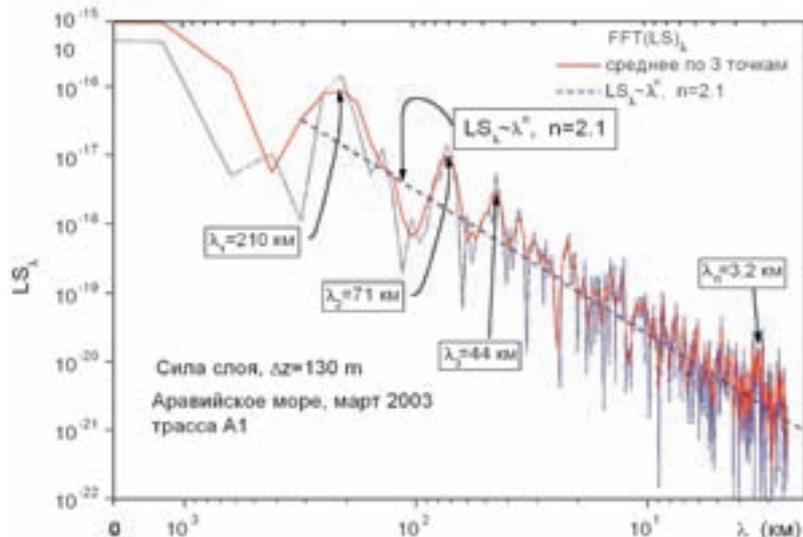


Рис. 7. Пространственный спектр силы слоя вдоль трассы в Аравийском море

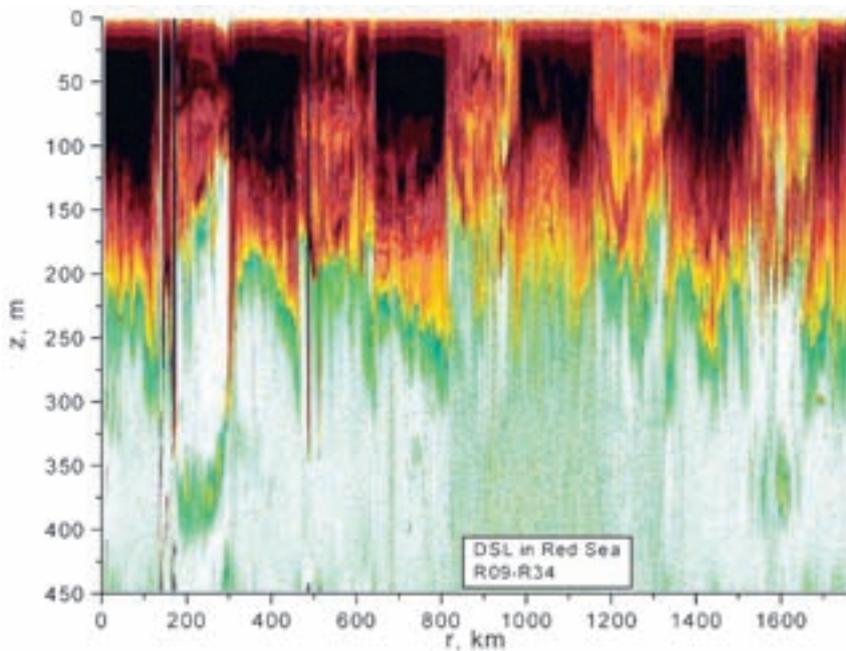


Рис. 8. Распределение коэффициента рассеяния звука вдоль трассы в Красном море

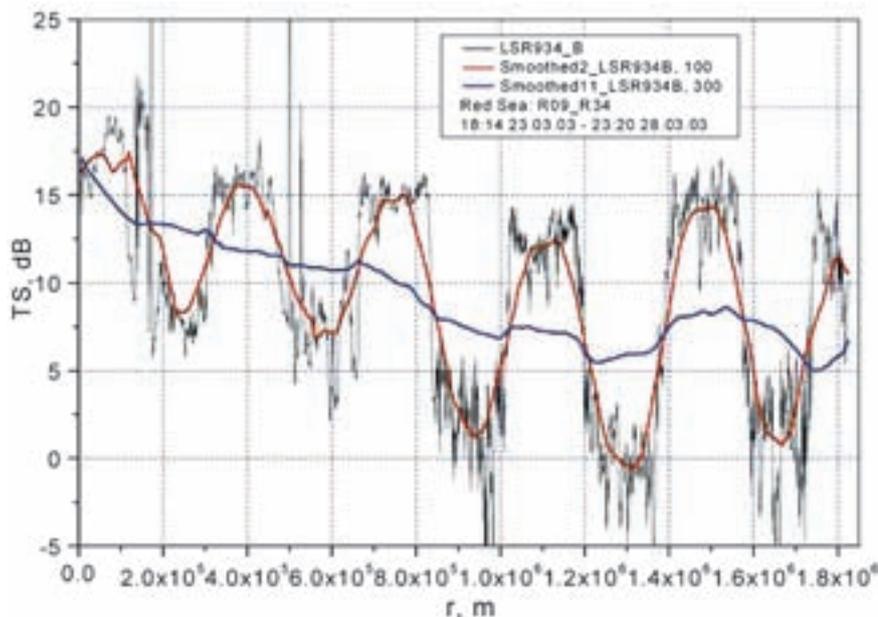


Рис. 9. Сила слоя ЗРС (в относительных единицах) на частоте 100 кГц в Красном море

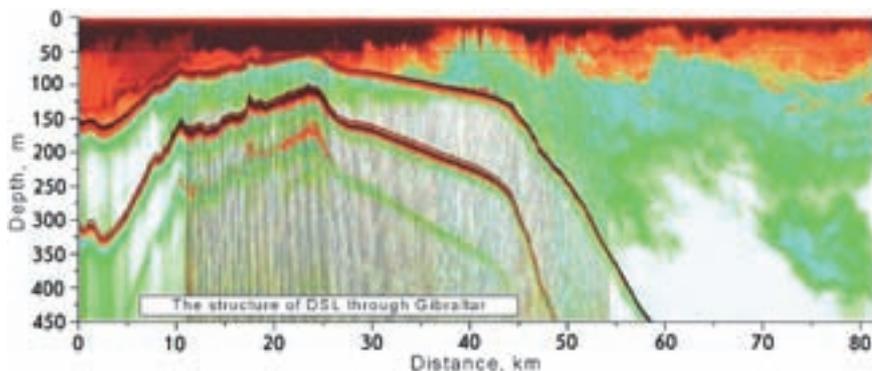


Рис. 10. Акустический разрез на конечном участке Гибралтара с выходом в Атлантический океан

водное течение, которое визуализируется вследствие рассеяния звука, имеющего турбулентное происхождение. Но особенно ярко выделен мощный приповерхностный слой, связанный с наличием большого количества планктона и интенсивно рассеивающий звук. Толщина этого слоя сильно изменяется при прохождении пролива. Видно, что со стороны Средиземного моря практически весь водный слой от поверхности до дна заполнен планктоном. Но особенно благоприятные условия для расцвета жизни планктонного сообщества наблюдаются в самом мелком месте, где идет интенсивное смешение средиземноморской и атлантической воды.

Далее при продвижении в Атлантический океан видно, как происходит формирование типичного океанического звукорассеивающего слоя. Главными его особенностями являются наличие ярко выраженного приповерхностного слоя толщиной до 100 м (дном) и глубоководного слоя, располагающегося на глубинах около 400 м. Следует отметить своеобразную пятнистость пространственного распределения планктона. Так, из рис. 10 для коэффициента рассеяния и из рис. 11 для силы слоя толщиной 250 м видно начальное формирование пространственной протяженностью около 10–20 км, а также около 50–70 км (масштаб синоптических вихрей).

Такая же картина видна и в спектральной области (рис. 12), где характерный масштаб L указан около каждого спектрального пика. Далее следующие высокочастотные пики $L_{3/2}$ и L_3 представляют, по-видимому, третью гармонику и ультрасубгармонику порядка $3/2$ от указанного основного спектрального масштаба в $L_1 = 78$ км. Далее при продвижении к мелко-

му масштабу возникают ярко выраженные спектральные пики, занимающие масштаб от L_{x1} до L_{x2} и отвечающие не кратным основному пику длинам волн. Представленная картина отличается от картины распределения звукорассеивающих слоев, обусловленных модуляцией, их внутренними волнами, которые играют основную роль на меньших пространственных масштабах от сотен метров до 1,5–2 км. Хотелось бы обратить внимание на этот промежуточный масштаб от L_{x1} до L_{x2} , который появляется в стохастических нелинейных моделях взаимодействия рыбы и фито- и зоопланктонного сообществ [15], дающих универсальные самоподобные законы распределения взаимодействующих фрактальных структур.

Значительный теоретический и практический интерес представляет изучение массообмена между Тихим океаном и Охотским морем через Курильские проливы, а также между Японским и Охотским морями через прол. Лаперуза. На рис. 13, 14 представлено распределение интенсивности рассеяния звука при проходе 4-го Курильского пролива из Охотского моря в Тихий океан, а также при проходе прол. Лаперуза из Охотского моря в Японское. Из рис. 13, 14 видна сложная структура звукорассеивающих слоев, отвечающая запутанной картине противотечений различных водных масс в проливах.

Изучение распределения коэффициента поглощения звука и параметра акустической нелинейности морской воды

Одновременно с исследованиями рассеяния звука в верхнем деятельном слое океана были проведены измерения параметров акустической нелинейности и затухания (поглощения) звука в деятельном слое моря. Сле-

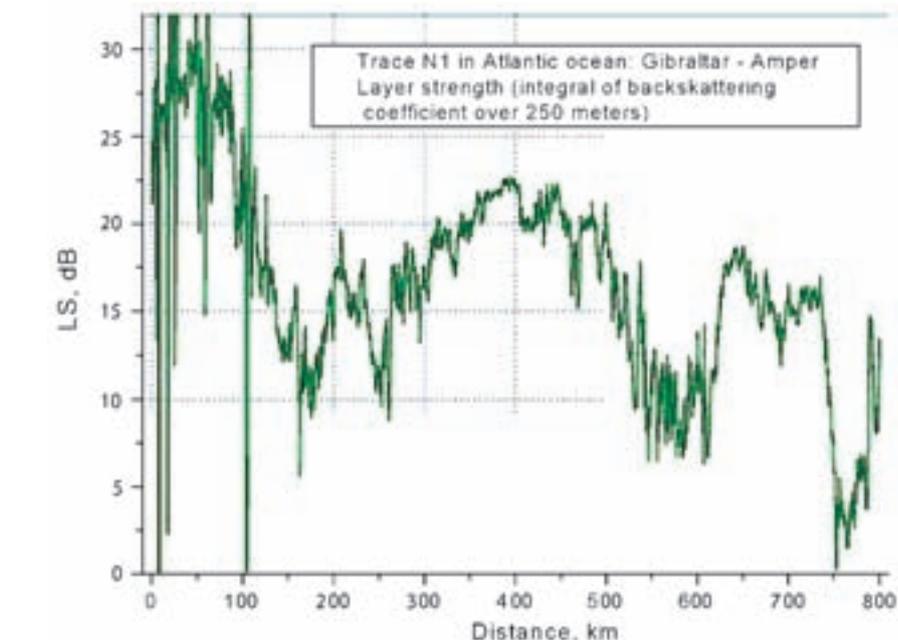


Рис. 11. Сила слоя толщиной 250 м в относительных единицах вдоль трассы от прол. Гибралтар до подводной горы Ампер

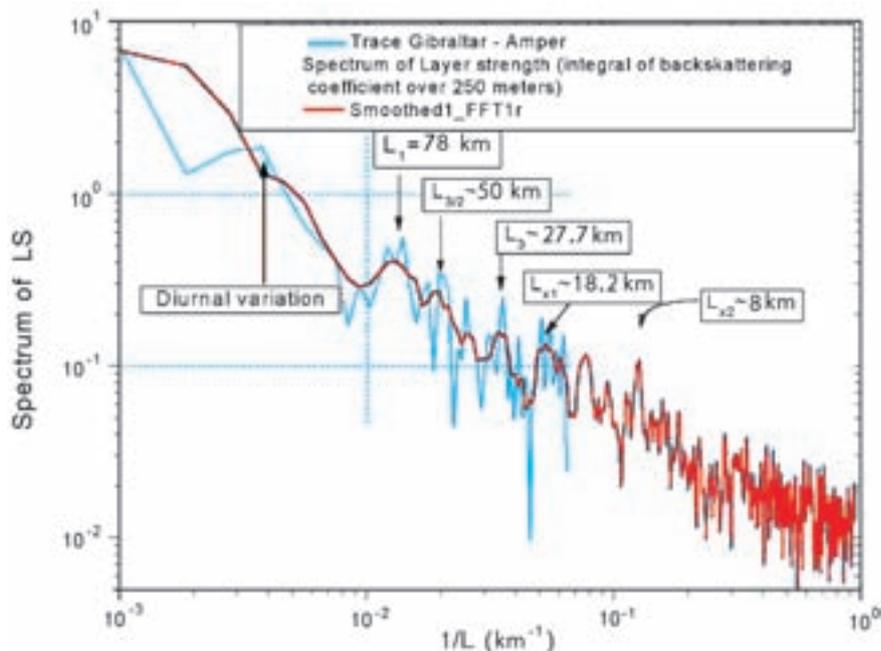


Рис. 12. Спектр силы слоя вдоль трассы в Атлантическом океане от прол. Гибралтар до подводной горы Ампер

дует заметить, что измерения указанных параметров в океане сопряжено с большими трудностями и в научной литературе практически отсутствует информация об их распределении в деятельном слое океана. Существуют лишь отрывочные данные, причем это в основном относится к линейному параметру – поглощению звука. Исследования нелинейности мор-

ской воды, да еще на различных глубинах, проводились буквально в единичных экземплярах и при этом в достаточно идеальных условиях. Нам удалось преодолеть ряд экспериментальных трудностей и на основе разработанных методик получить новые результаты, о которых будет сказано ниже.

На рис. 15, 16 содержатся результаты зондирования не-

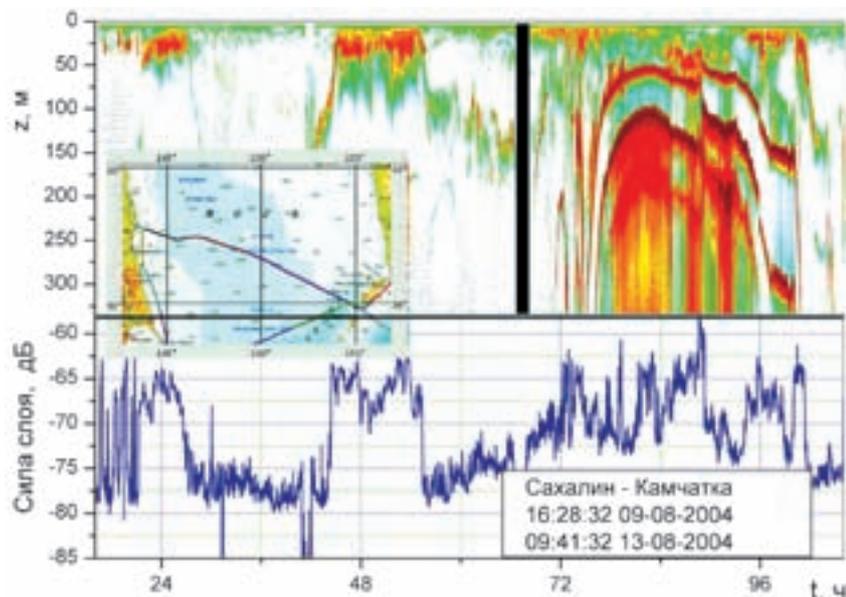


Рис. 13. Рассеяние звука вдоль протяженной трассы в Охотском море и при проходе 4-го Курильского пролива из Охотского моря в Тихий океан. Частота 100 кГц

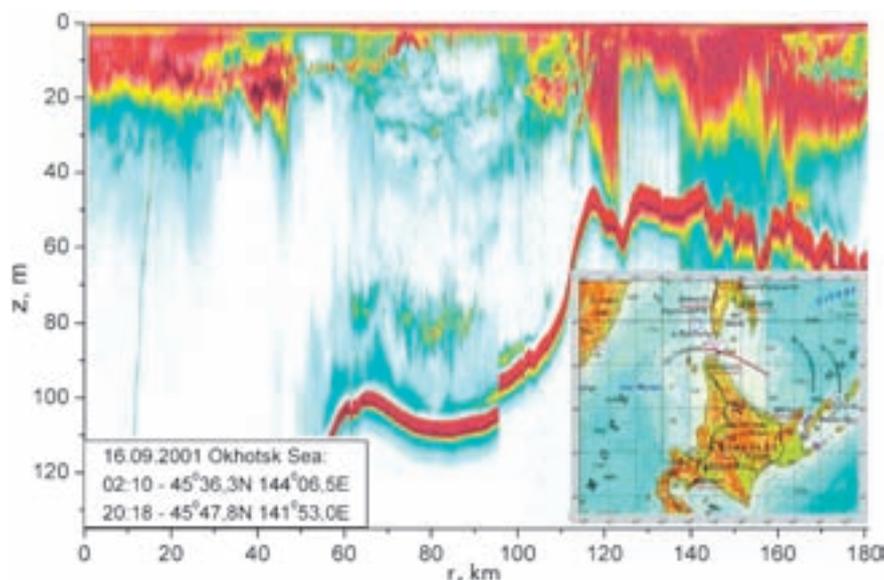


Рис. 14. Рассеяние звука вдоль трассы через прол. Лаперуза из Охотского моря в Японское море

линейного параметра в верхнем слое океана. Видно, что на определенной глубине происходит резкое увеличение нелинейного параметра примерно в среднем в полтора раза по сравнению с величиной нелинейного параметра для поверхности моря. Это очень большое увеличение, достаточно упомянуть, что имеющиеся в литературе данные по нелинейному акустическому параметру при преобразовании во вторую гармонику составляют

буквально считанные проценты. При этом весь эффект влияния микронеоднородностей морской среды обычно заключался в увеличении флуктуационной компоненты нелинейного параметра. Здесь же мы, наряду с увеличением флуктуаций нелинейного параметра в местах расположения ЗРС, наблюдаем также и резкие изменения его средних значений.

Необходимо подчеркнуть одно важное обстоятельство –

мы проводим измерения нелинейного параметра не на второй гармонике, а на разностной частоте 15 кГц при частоте накачки 700 кГц, когда нелинейное взаимодействие двух близко расположенных по частоте высокочастотных сигналов приводит к резкому усилению на частоте разности указанных сигналов. Оказывается, этот метод регистрации усиления на разностной частоте очень чувствителен к наличию микронеоднородностей в воде. Таким образом, применение этого нелинейного метода позволяет получить новые данные.

Для сравнения с данными по нелинейности и поглощению звука на рис. 16 представлены соответствующие измерения коэффициента рассеяния звука, произведенные на ст. 16 в Индийском океане. Полученные результаты показывают, что значительное изменение параметра нелинейности наблюдается на границах ЗРС, в местах больших градиентов коэффициента рассеяния звука.

Следует отметить, что представленные на рис.15 результаты для нелинейного параметра все же не являются универсальными – природа оказывается сложнее. В качестве противоположной глубинной зависимости на рис. 17 представлен нелинейный параметр, измеренный на ст. 24 в Индийском океане. Здесь также наблюдается сильное изменение нелинейного параметра, но вид этой зависимости более напоминает зависимость от глубины нелинейного параметра морской воды с пузырьками [10,11,16–18].

На рис. 18 содержатся экспериментальные данные зондирования по измерению поглощения звука в зависимости от глубины, представленные вместе с данными по распределению нелинейного параметра. Оказалось, что вначале происходит постепенное уменьшение по-

глощения звука по сравнению величиной на поверхности моря и в области скачка параметра нелинейности также происходит резкое уменьшение коэффициента поглощения звука.

В качестве дополнительной информации, позволяющей более полно представить картину распределения гидрофизических параметров в деятельном слое океана, на рис. 19 представлены данные для распределения температуры и солёности, измеренные одновременно с коэффициентом поглощения звука и нелинейным параметром. Отчетливо видно, что резкие вариации коэффициента поглощения звука и нелинейного параметра соответствуют градиентам температуры и солёности.

В заключение следует отметить, что как нелинейный параметр, так и коэффициент поглощения звука, видимо, очень чувствительны к типу неоднородностей. Вдоль всех трасс в Индийском океане мы наблюдали и увеличение этих параметров с глубиной, и резкое их уменьшение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты акустических исследований в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах доказывают возможность акустического мониторинга мелкомасштабных неоднородностей морской среды в виде планктона, взвесей, газовых пузырьков, мелкомасштабной турбулентности. На основе этих результатов предложены и развиты методы акустического мониторинга крупномасштабных неоднородностей морской среды, таких как фронтальные разделы, течений, мезомасштабных вихрей, крупномасштабных внутренних волн на основе акустического зондирования, которые осуществляются по ходу судна.

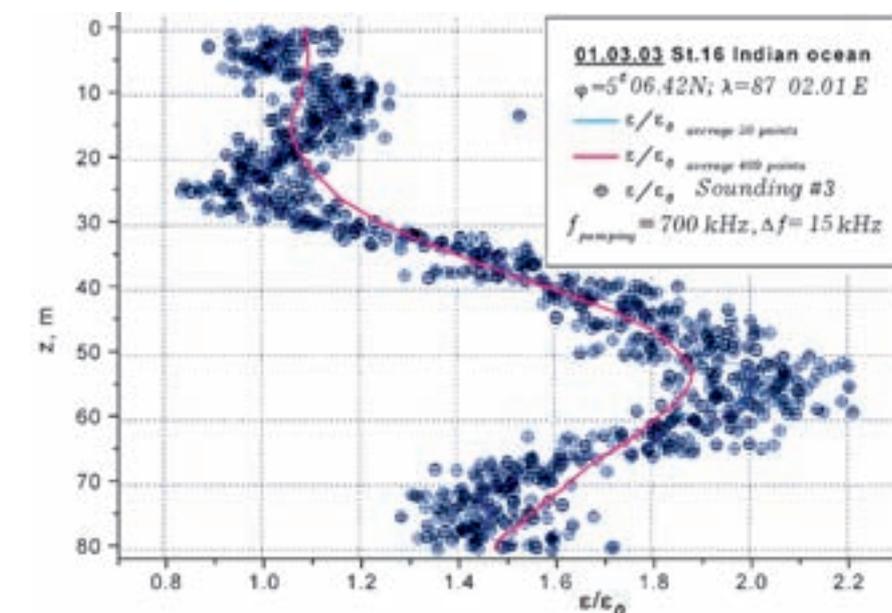


Рис. 15. Зависимость нелинейного параметра от глубины на ст. 16 в Индийском океане

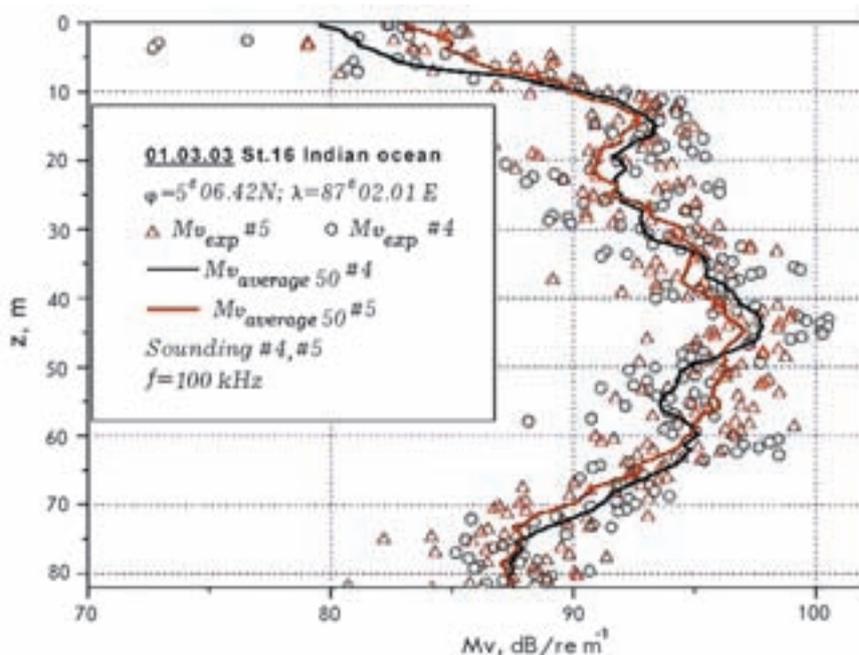


Рис. 16. Зависимость коэффициента рассеяния звука от глубины на ст. 16 в Индийском океане

Проведены исследования обратного рассеяния звука с применением традиционных линейных методов в режиме одночастотного излучения. Эти исследования представляли интерес в связи с важностью задачи проведения в процессе движения судна оперативной оценки изменчивости структуры морской среды. Данное обстоятельство особенно актуаль-

но вблизи фронтальных зон и границ течений, когда характеристики среды изменяются на небольшом расстоянии и поэтому никакие контактные методы не позволяют осуществлять подробную пространственную съемку структуры среды вблизи таких границ. Важные результаты были получены при исследовании рассеяния звука в приповерхностном слое океа-

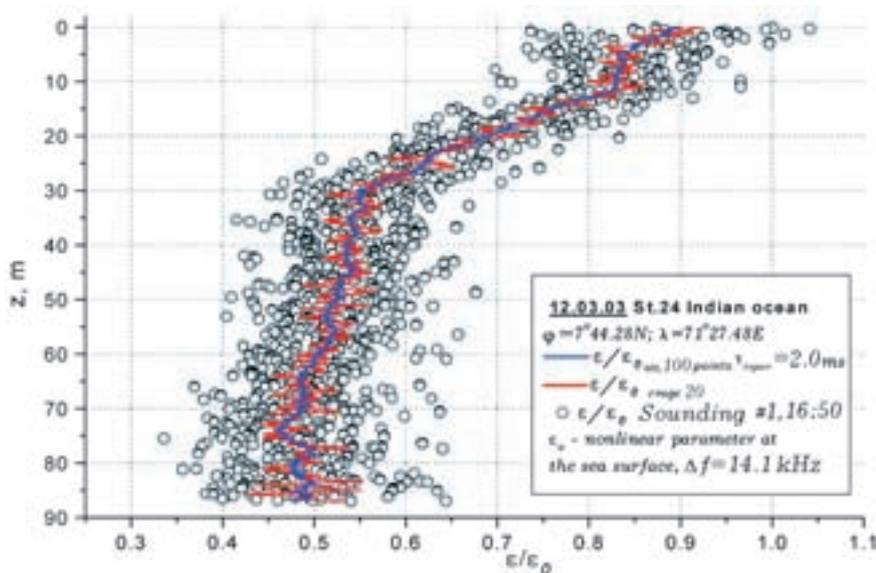


Рис. 17. Пример обратной зависимости нелинейного параметра от глубины на ст. 24 в Индийском океане

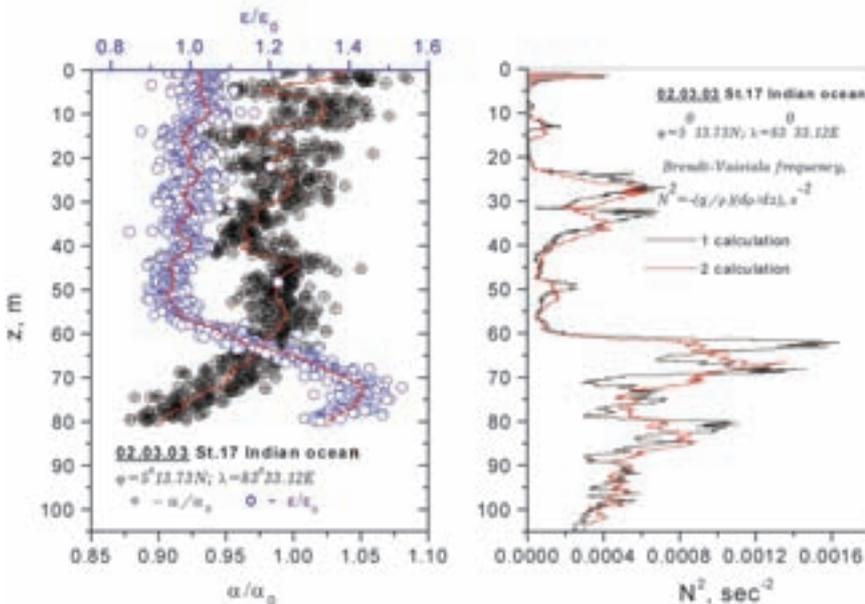


Рис. 18. Зависимость коэффициента поглощения звука и нелинейного параметра от глубины на ст. 17 в Индийском океане. Здесь же представлено распределение частоты Брента–Вайсяля, характеризующей параметры внутренних волн и распределение градиентов гидрофизических параметров в области термоклина

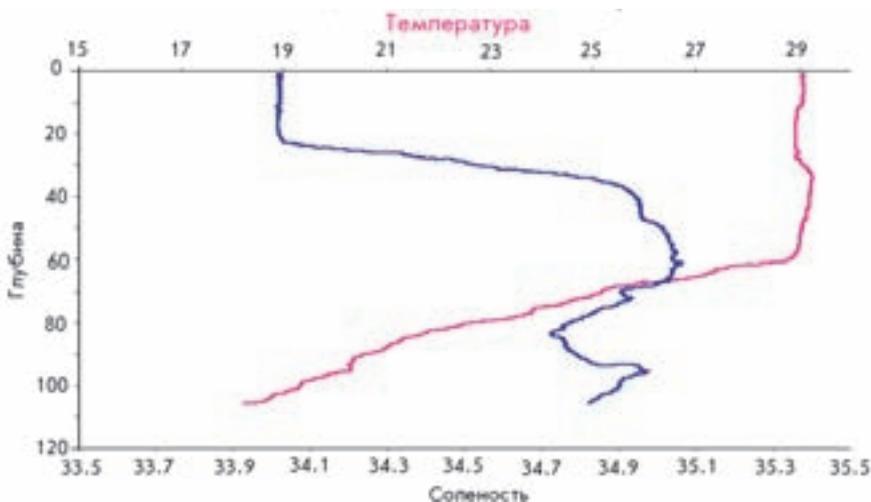


Рис. 19. Вертикальные профили температуры и солёности на ст. 17 в Индийском океане, 83°32.888' E, 05°14.058' N, GMT = =12:52,02.03.2003

на при непрерывном зондировании вдоль длинных трасс, пересекающих границы крупномасштабных неоднородностей (фронтов), во всех регионах вдоль маршрута следования судна, и в отчете представлены результаты соответствующих исследований.

Второе направление составили исследования с применением нелинейных акустических методов. Эти исследования проводились с помощью специально разработанной зондирующей системы, которая, кроме того, могла измерять и другие гидрофизические параметры верхнего слоя океана: температуру, скорость звука на частоте 2 МГц и коэффициент поглощения звука на частоте 700 кГц. Применение указанной системы позволяло связать данные о структуре океана, полученные по обратному рассеянию звука, с данными, полученными методом зондирования in situ.

Основные результаты, представленные в работе, были получены в период кругосветной экспедиции на паруснике «Надежда», организованной в 2003–2004 гг. в честь 200-летия первой русской кругосветной экспедиции Морским государственным университетом имени адмирала Г.И. Невельского совместно с Тихоокеанским океанологическим институтом имени В.И. Ильичева ДВО РАН и Институтом проблем морских технологий ДВО РАН.

Работа была поддержана грантами РФФИ №03-02-16710, 06-05-65095, РФФИ-ДВО №06-05-96206, а также грантом ДВО РАН №06-1-П17-071 Программы №17 фундаментальных исследований РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клей, Медвин Г. Акустическая океанография: М.: Мир, 1980.
2. Андреева И.Б., Самоволькин В.Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах // М.: Агропромиздат, 1986.
3. Сандлер Б.М., Селивановский Д.А., Стунжас П.А., Крупаткина Д.К. Газовые пузырьки и морской фитопланктон. Ультразвуковые реверберационные измерения // Океанология. 1992. Т. 32, № 1. С. 92–100.
4. Weibe P., Greene C., Stanton T. Sound scattering by live zooplankton and micronecton // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 88, N 5. P. 2346–2359.
5. Stanton T. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and prolonged objects // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86. P.1499–1510.
6. Crawford A., Hay A.. Deterring suspended sand size and concentration from multifrequency acoustic backscatter // J. Acoust. Soc Am. 1993. V. 94, N 6. P. 3312–3324.
7. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1990. 237 с.
8. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
9. Акуличев В.А., Буланов В.А., Кленин С.А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде // Акуст. ж. 1986. Т. 32, вып. 3. С. 289–295.
10. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микрогетерогенных жидкостей. Владивосток: Дальнаука, 2001. 280 с.
11. Akulichev V.A., Bulanov V.A. «The transient acoustic backscattering from different microinhomogeneities in sea water» // Proceedings of the Second European Conference on Underwater acoustics / ed. by L. Bjorno, ECSC-EC-EAEC, Brussels. V. I, 1994. P. 431–436.
12. Цейтлин В.Б. Размерное распределение пелагических организмов в тропических районах океана // Океанология. 1981. Т. 21, № 1. С. 125–131.
13. Буланов В.А., Корсков И.В., Попов П. Н., Полоничко В.Д., Соседко С.Н. «Исследование рассеяния звука и параметров верхнего слоя океана» // Морские технологии / под ред. акад. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 1998. Вып. 2. С. 132–156.
14. Буланов В.А. Акустический мониторинг деятельного слоя моря // Вестн. ДВО РАН. 1998. № 3. С. 19–33.
15. Медвинский А.Б., Петровский С.В., Тихонова И.А. и др. «Формирование пространственно-временных структур, фракталы и хаос в концептуальных экологических моделях на примере взаимодействующих популяций планктона и рыбы» УФН, 2002. Т. 172, №1, С. 31–66.
16. Буланов В.А. Рассеяние звука, распределение пузырьков и акустическая нелинейность приповерхностного слоя моря // Акустика океана. Сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 1998. С. 69–73.
17. Акуличев В.А., Буланов В.А. О взаимосвязи кавитационной прочности, нелинейного параметра и концентрации пузырьков в жидкости // ДАН. 1999. Т. 368, № 2. С. 194–197.
18. 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 // Proceed of the 18th International Congress on Acoustics. ICA 2004 International Commission for Acoustics: Kyoto 2004. P. 2415– 2422.

Парусник «Надежда». Фото В. Буланова

