Электронный журнал «Техническая акустика»
http://www.ejta.org

2011, 1

В. А. Буланов, А. В. Стороженко

Тихоокеанский океанологический институт им. В .И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН. 690041, Владивосток, Балтийская 43,
e-mail: bulanov@poi.dvo.ru, storozhenko_and@mail.ru

О возможности акустической оценки распределения планктона в море

Получена 07.12.2010, опубликована 19.01.2010

Изучена возможность акустической оценки распределения планктона в море. Основой являются формулы для коэффициента рассеяния звука, включающие различные полуэмпирические зависимости сечения рассеяния на одиночном гетерогенном включении и два типа функций распределения планктона по размерам, известные из литературы — степенное и гауссовское. Полученная система уравнений позволяет по данным о коэффициенте рассеяния оценить важную характеристику биопродуктивности водных масс — массовую концентрацию планктона и его суммарное количество в интервале размеров. Представлены сравнительные оценки концентрации планктона по данным о рассеянии звука, полученным в Японском и Охотском морях.

Ключевые слова: рассеяние звука, мелкомасштабная структура, планктон, деятельный слой океана.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическое зондирование позволяет изучать мелкомасштабную структуру морской среды и ее пространственно-временную изменчивость, связанную с турбулентными образованиями, проявлением внутренних волн, наличием пузырьков, твердых взвесей, а также планктона и других биологических объектов [1–5]. Зондирование на основе рассеяния звука является дистанционным методом и в ряде случае является наиболее предпочтительным в практике океанологических исследований. Особый интерес представляет разработка методов решения обратных задач, которые являются основой для применения методов акустического зондирования.

Одним из важных аспектов акустического мониторинга биоресурсов является определение концентрации, размерного и видового состава зоопланктона. Эти данные необходимы при изучении особенностей пространственного распределения, поведения рыб и других гидробионтов, при оценке промысловой значимости скоплений, состояния запасов популяции и т. п. Основу данной работы составляет обсуждение связи между коэффициентом рассеяния звука m_v и распределением биомассы в морской среде. Цель работы — решение практического вопроса об оценке

распределения биомассы в деятельном слое океана по данным о рассеянии звука. В настоящей работе в основу такого рассмотрения положена известная формула для коэффициента рассеяния звука, включающая различные полуэмпирические сечения рассеяния на одиночном включении и два типа функций распределения включений по размерам — степенное и гауссовское [5, 6]. Постановка задачи в общих чертах традиционна. Новый подход, заключается в использовании полуэмпирических формул для сечения рассеяния на одиночном включении и двух практически важных типов функций распределения включений по размерам, который позволил выявить связь между экспериментальными и теоретическими характеристиками. Полученная система уравнений позволяет по данным о коэффициенте рассеяния оценить важную характеристику биопродуктивности водных масс — массовую концентрацию включений и их суммарное количество в интервале размеров [7, 8].

1. ВЗАИМОСВЯЗЬ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ПЛАНКТОНА

Для описания рассеяния звука в среде с микронеоднородностями вводят понятие коэффициента рассеяния m_v, который в борновском приближении определяется согласно выражению

$$I_{bs} = I_i V m_V / r^2, \tag{1}$$

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 $V = \pi r^2 \theta^2 c\tau / 2$, где θ — ширина диаграммы направленности излучателя, c — скорость звука, τ — длительность импульса звука. Из формулы (1) можно получить экспериментальное значение коэффициента обратного рассеяния звука в жидкости в виде

$$m_{v_{\exp}} = (2/\pi\theta^2 c\tau)\left(P_{bs}/P_i\right)^2. \tag{2}$$

С помощью приведенных формул можно экспериментально определить частотную зависимость $m_{v_{\exp}}(\omega)$, которая позволяет установить тип рассеивателей, а также некоторые их характеристики, например, функцию распределения по размерам $g(R)$ или объемную концентрацию V_0, определяемую в виде

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

Основой для теоретического рассмотрения вопроса о связи между коэффициентом рассеяния звука m_v и распределением биомассы в морской среде является формула для объемной концентрации (3) и формула для коэффициента рассеяния, которую с учетом

возможной пространственной изменчивости вдоль расстояния r можно записать в виде [5, 7]

$$m_v(r) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_1(R) g(R,r) dR . \tag{4}$$

Здесь $\sigma_1(R)$ сечение рассеяния звука на одиночном включении, $g(R,r)$ — функция распределения включений по размерам R в различных точках пространства r. Имея объемную концентрацию включений, можно определить массовую концентрацию по формуле [7, 8]

$$m_g(r) = (4\pi / 3) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \rho'(r) R^3 g(R,r) dR , \tag{5}$$

где $\rho'(r)$ — плотность среды, составляющей включения в различных точках пространства.

2. РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА ПО РАЗМЕРУ

Количественно связь размеров и концентрации зоопланктона при l<1 см была впервые получена Цейтлиным [6] для организмов, обитающих в тропических биологически бедных и биологически богатых районах океана, которая выражается формулой $dN/dW = AW^{-2}$, где N — количество экземпляров в 1 $м^3$, W — вес, выражаемый, как правило, в миллиграммах, A — константа, характеризующая обилие жизни в районе. В итоге можно получить степенную функцию распределения планктона по размерам вида $dN / dl = A_l l^{-n}$, где $A_l \approx 4.7$, $n \approx 3.7$, при этом размерности таковы: $[A_l]$=см^{m}м$^{-3}$, $dN / dl =$ см$^{-1}$м$^{-3}$. В случае больших размеров зоопланктона при l>1 см функция распределения имеет вид гауссовской функции с максимумом при некотором размере, который может быть ярко выраженным или несколько размазанным в зависимости от вида зоопланктона. Для типичного океанического зоопланктона с размерами от 0,8…1 см (копеподы, амфиподы) до 5…9 см (эфвазиды, декаподы) обычно имеются следующая закономерность распределения по размерам — с увеличением размера распределение становится уже.

2.1. Случай степенной функции распределения по размерам

Пусть $g(R) = AR^{-n}$ [4, 7], тогда коэффициент рассеяния будет определяться формулой

$$m_v(r, R_{\max}) = A(r)\tilde{\sigma}(R_{\max}) , \quad \tilde{\sigma}(R_{\max}) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_1(R) R^{-n} dR . \tag{6}$$

Из (6) можно написать

$$A(r) = m_v(r, R_{\max}) / \tilde{\sigma}(R_{\max}) . \tag{7}$$

С другой стороны, из (5) для m_g следует, что

$$m_g(r, R_{\max}) = (4\pi/3)\rho' A(r) R_{\max}{}^{4-n}/(4-n), \quad n < 4. \tag{8}$$

Из формул (7), (8) получаем

$$m_g(r, R_{\max}) = \frac{4\pi\rho'}{3(4-n)} \frac{R_{\max}{}^{4-n}}{\tilde{\sigma}(R_{\max})} m_v(r). \tag{9}$$

2.2. Случай гауссовской функции распределения по размерам

В случае распределения включений по размерам с гауссовской функцией вида $g(R,r) = B(r)\exp\left[-\left(R-\bar{R}(r)\right)^2/\Delta^2\right]$ имеем

$$m_v(r) = B(r)\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_1(R)\exp\left[-\left(R-\bar{R}(r)\right)^2/\Delta(r)^2\right]dR. \tag{10}$$

Интеграл, входящий в (10), в случае более плавного поведения функции $\sigma_1(R)$ по сравнению с гауссовской функцией вычисляем стандартным образом методом перевала. В результате имеем [7, 8]

$$m_v(r,\bar{R}) = B(r)\sqrt{\pi}\Delta\sigma_1(\bar{R})\frac{e^{-(\Delta/2\bar{R})^2}}{\sqrt{1+(\Delta/2\bar{R})^2}} \approx B(r)\sqrt{\pi}\Delta\sigma_1(\bar{R}). \tag{11}$$

Следует отметить, что в том случае, если функция $\sigma_1(\bar{R})$ будет иметь резонансное поведение, то вычисление интеграла усложняется, т. к. вклад в интеграл будут давать два максимума подинтегрального выражения — резонансный максимум и максимум функции распределения по размерам, которые в общем случае не совпадают. Можно показать [7, 8], что резонансный вклад следует учитывать в следующих случаях: 1) при $R_0 < \bar{R}$ в случае, если $\mu = \delta_\Delta{}^2/\delta << 1$; где $\delta_\Delta = \bar{R}/\Delta$, δ — постоянная затухания на резонансе; 2) при $R_0 < \sqrt{\mu}\bar{R}$ в случае, если $\mu = \delta_\Delta{}^2/\delta >> 1$. В случае узкого гауссовского распределения или включения с невысокой добротностью влияние резонансного поведения сечения одиночных включений на коэффициент рассеяния звука оказывается существенным только для малых включений с $R_0 < \bar{R}$. Отметим, что при выборе частот это соответствует высоким частотам $\omega > \omega_0(\bar{R})$. В другом предельном случае высокодобротных включений с достаточно широкой функцией распределения спектр размеров включений, которые влияют своими резонансными свойствами на поведение коэффициента рассеяния, в целом расширяется до больших значений $\sqrt{\mu}\bar{R}$.

Вернемся теперь к вычислению зависимости между m_v и m_g в случае гауссовского распределения. Вычисление интеграла (5) проведем аналогично (10), получаем

$$m_g(r,\bar{R}) = (4\pi/3)\rho' B(r)\sqrt{\pi}\Delta\bar{R}^3. \tag{12}$$

Подставляя (12) в (11) получаем для гауссовского распределения

$$m_g = (4\pi/3)\rho'(\bar{R}^3/\sigma_1(\bar{R}))m_v. \tag{13}$$

3. ОБЩЕЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ СВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОМАССЫ

Можно получить общее выражение, позволяющее по экспериментальным данным для коэффициента рассеяния $m_{v_{\exp}}$ получать данные по распределению биомассы m_g. В качестве модели сечения рассеяния σ_1 можно выбрать одну из многочисленного ряда полуэмпирических моделей (см., например, [9–12]). В дальнейшем для проведения сравнения с экспериментальными значениями рассмотрим сечения, определяемые моделью Стентона [10, 11] и моделью на основе формулы Чу и Горской [12]. Указанные сечения не имеют резонансного характера, поэтому выражение для связи m_g и m_v существенно упрощаются как для степенного, так и для гауссовского распределения. В итоге можно написать следующее общее выражение, позволяющее по экспериментальным данным для m_v получать данные по распределению биомассы m_g в рамках двух распределений — степенного и гауссовского:

$$m_g^{(P,G)}(r, f) = D^{(P,G)}(f) m_v(r, f), \tag{14}$$

где коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ равен

$$D^{(P,G)}(f) = \begin{cases} \dfrac{4\pi\rho'}{3(4-n)} \dfrac{R_{\max}^{\;4-n}}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_1(R, f) R^{-n} dR}, & g^{(P)} \sim R^{-n}, \\ \dfrac{4\pi\rho'}{3} \dfrac{\bar{R}^3}{\sigma_1(\bar{R}, f)}, & g^{(G)} \sim e^{\left[-\left(R-\bar{R}(r)\right)^2/\Delta^2\right]}. \end{cases} \tag{15}$$

На рис. 1 и рис. 2 представлена зависимость коэффициента $D^{(P)}$ от частоты и максимальных размеров включений, подчиняющихся степенному закону распределения по размерам. Данные графики позволяют определить массовую концентрацию включений m_g (например, зоопланктона) в граммах на литр морской воды по экспериментальным значениям коэффициента рассеяния звука m_v, измеренным в м$^{-1}$. Предварительно укажем, что существует эмпирическая связь веса (в граммах) и длины планктона (в см):

$$W(L) = 8.035 \cdot 10^{-5} L^{2.295}, \tag{16}$$

а также веса и радиуса эквивалентной сферы:

$$R(L) \approx (0.996 W(L) + 7.7 \cdot 10^{-10})^{1/3}. \tag{17}$$

Именно последняя величина фигурирует в представленных выше уравнениях (14), (15).

4. ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАНКТОНА ПО АКУСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Предположим, что максимальная длина планктона порядка сантиметров, тогда эквивалентный размер в распределении планктона по размерам имеет величину $R_{\max}$ ~0.04 см. Для типичной частоты f ~100 кГц получаем $D^{(P)}$ ~5·10^4 г·м/л и для достаточно часто встречающихся в морской практике величин m_v ~10^{-6}…10^{-7} м$^{-1}$, получаем m_g ~5·10^{-2}…10^{-3} г/л.

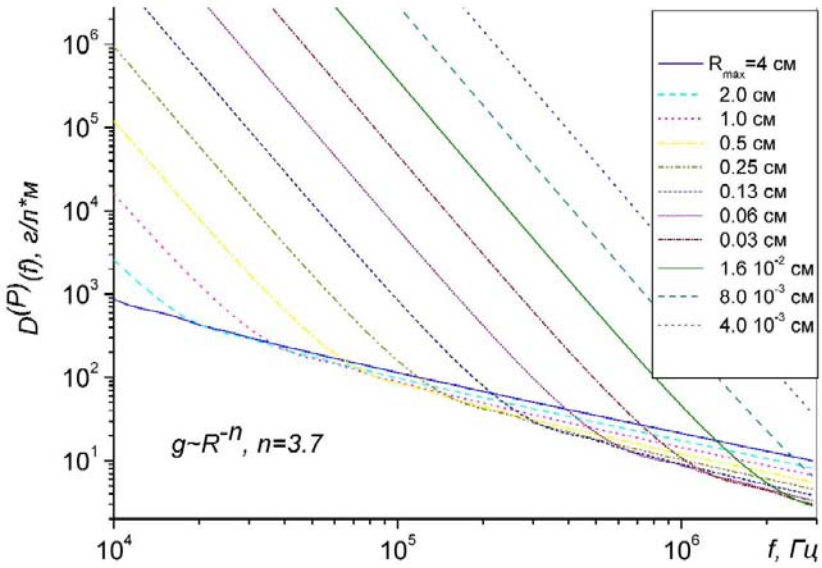

Рис. 1. Зависимость $D^{(P)}(f)$ при различных максимальных размерах включений

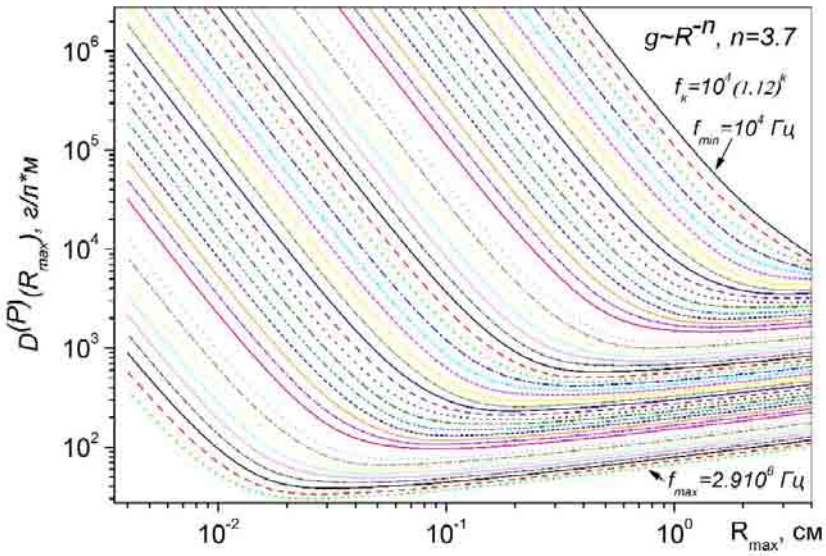

Рис. 2. Зависимость $D^{(P)}(R_{\max})$ при различных частотах звука

Из сравнения результатов облова планктона и рассчитанной m_g, последняя является слишком низкой величиной. Для приведения в соответствие экспериментальных результатов и оценок по приведенным выше формулам следует уменьшить максимальный размер планктона, который на данной частоте еще играет определяющую роль. Можно видеть, что уменьшение $L_{\max}$ до 2 мм (это эквивалентно уменьшению $R_{\max}$ до величины ~0.01 см), дает $D^{(P)}$~10^6 г·м/л и соответственно повышает m_g до величины m_g~1 г/л, находящейся в границах экспериментально установленной оценки концентрации планктона.

Представим теперь сравнительные оценки концентрации планктона по данным о рассеянии звука, полученным в кругосветной экспедиции на парусно-учебном судне «Надежда» Морского государственного университета им. Г. И. Невельского в 2003–2004 гг. [13, 14]. Некоторые результаты представлены на рис. 3 для различных районов Атлантического, Индийского и Тихого океанов [7, 8].

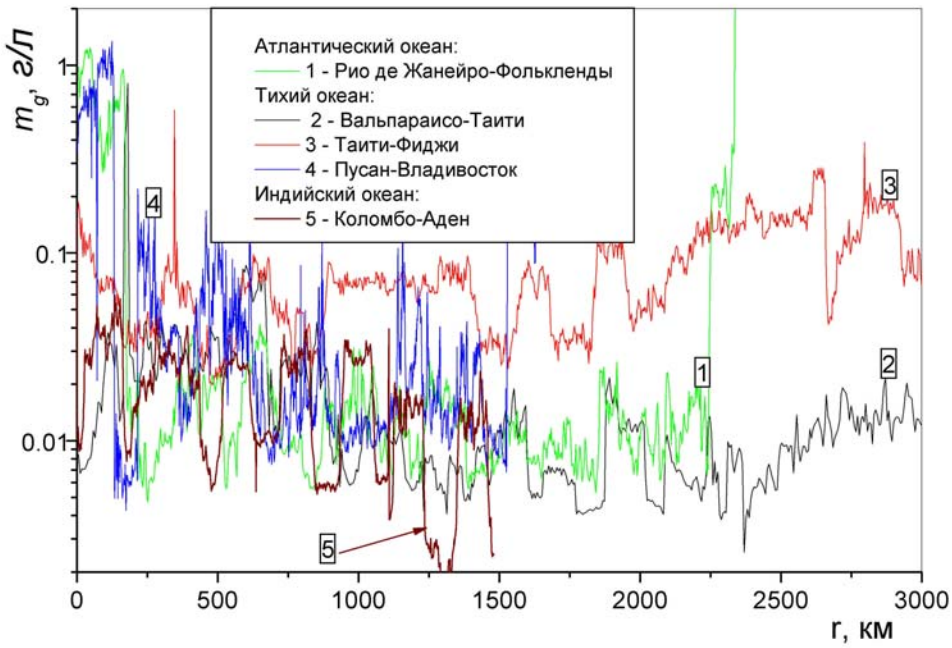

Рис. 3. Концентрация планктона по данным о рассеянии звука для различных районов Мирового океана (данные кругосветной экспедиции на ПУС «Надежда», 2003–2004 гг.)

Из рис. 3 видно, что в открытом океане средняя концентрация планктона примерно одинакова в различных районах. Хорошо видны вариации концентрации планктона в открытых частях океана. Концентрация планктона существенно возрастает вблизи островов в тропической части океана (трасса Таити-Фиджи), а также в окраинных морях (Японское море), что согласуется с результатами различных авторов [1–3, 15]. Следует отметить, что в шельфовых районах и окраинных морях контрастность суточных вариаций концентрации планктона уменьшается.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИОМАССЫ НА ОТДЕЛЬНЫХ ТРАССАХ В ЯПОНСКОМ И ОХОТСКОМ МОРЯХ

5.1. Исследования рассеяния звука на шельфе Японского моря

На рис. 4 представлено распределение коэффициента рассеяния звука $m_v(z,r)$ для трассы на шельфе Японского моря от мыса Шульца залива Петра Великого в сторону открытого моря, полученные в начале июня 2007 г.

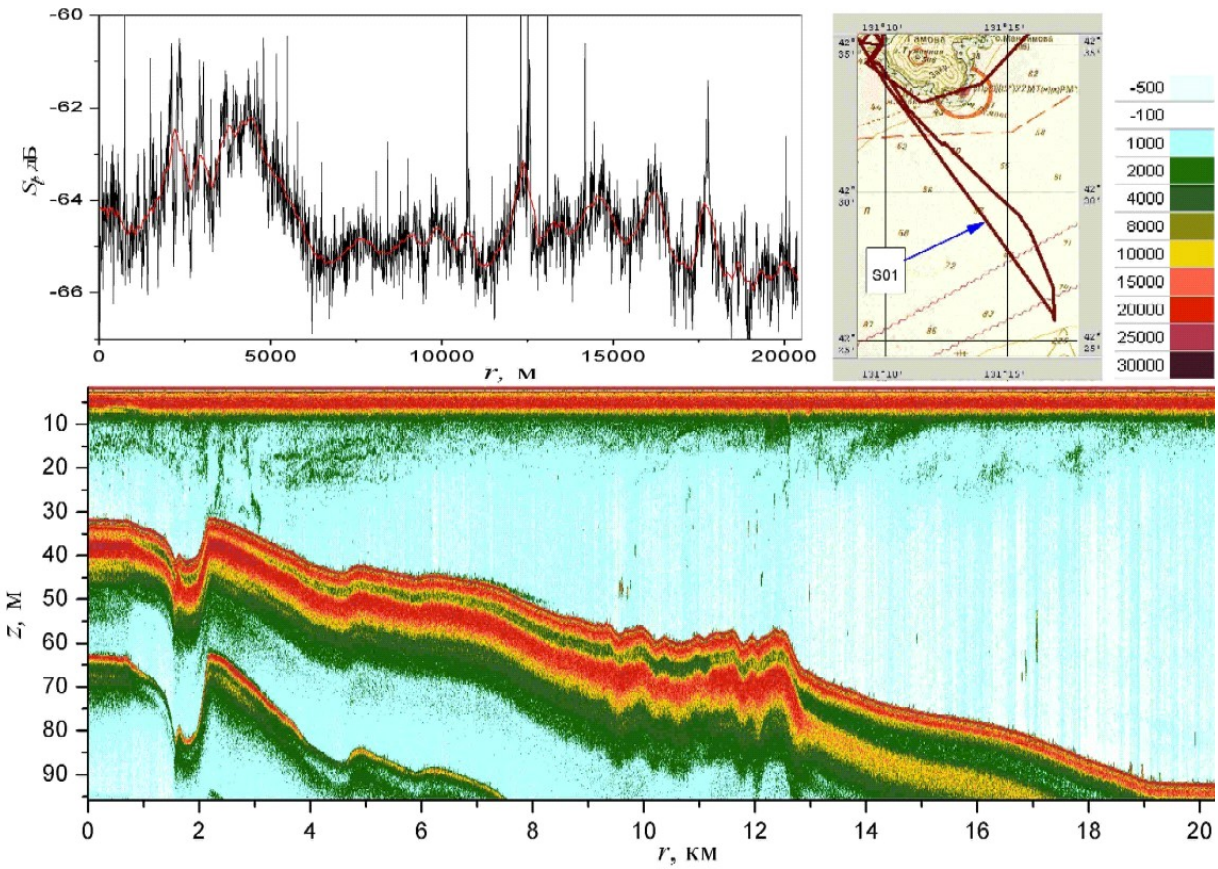

Рис. 4. Распределение коэффициента рассеяния звука $m_v(z,r)$ для трассы на шельфе Японского моря в весенний период

Наряду с коэффициентом рассеяния m_v для характеристики звукорассеивающего слоя часто вводят силу слоя по формуле

$$S_l(\omega) = 10\lg\left[\int_0^{h_{\max}} m_V(\omega, z)dz\right], \tag{18}$$

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). Видно, что сила слоя величина безразмерная, но зависящая от толщины слоя.

В левом верхнем углу рис. 4 представлена зависимость силы звукорассеивающих слоев $S_l(r)$ вдоль трассы (схема — в правом верхнем углу), которая характеризует существенную горизонтальную неоднородность распределения мелкомасштабных неоднородностей.

5.2. Оценка биопродуктивности водных масс по акустическим данным

В предположении, что основной вклад в величину коэффициента рассеяния звука вносит планктон, на рис. 5 представлено распределение массы планктона m_g, сосредоточенной в импульсном объеме сонара и приходящейся на элемент длины трассы, представленной на рис. 5 для коэффициента рассеяния звука $m_v(z,r)$, Если проинтегрировать данную кривую по всей длине трассы, можем оценить общую массу планктона m_g, содержащуюся в облученном объеме воды вдоль всей трассы длиной около 21 км. В итоге она дает среднюю концентрацию планктона по трассе около 0.01 г/л, согласующиеся с данными, представленными на рис. 3. Эта величина соответствует характерным значениям плотности биомассы планктона, которая по результатам различных авторов содержится в морской воде в схожих районах моря [1–3, 12–15].

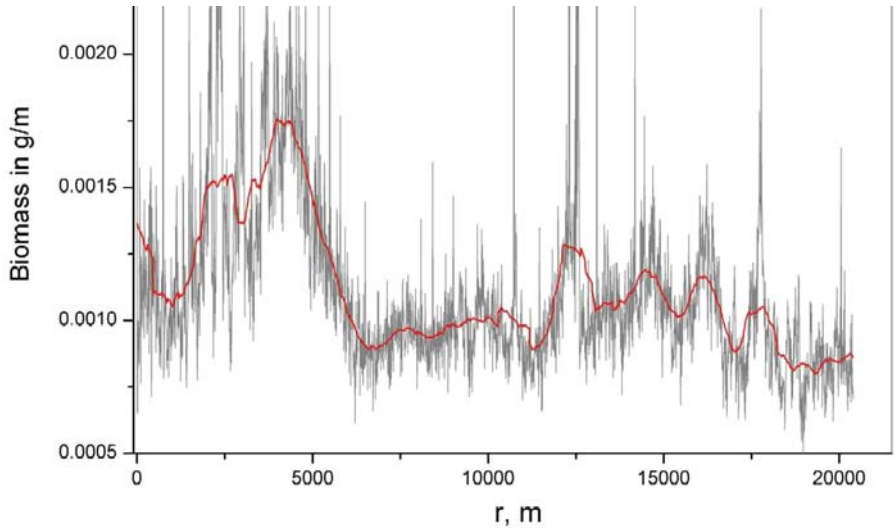

Рис. 5. Распределение массы планктона $m_g(r)$, сосредоточенной в импульсном объеме сонара и приходящейся на элемент длины трассы. Данные для трассы соответствуют рис. 4 для $m_v(z,r)$

6. ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА В ОХОТСКОМ МОРЕ

На рис. 6 представлена пространственная структура коэффициента рассеяния звука на мелкомасштабных неоднородностях биологического происхождения на частоте 100 кГц в верхнем слое Охотского моря в августе 2010 г. (верхний рисунок), спектр силы рассеивающего слоя вдоль трассы, рассчитанной при использовании формулы (18) (на врезке вверху) и оценка распределения биомассы вдоль трассы (нижний рисунок). Акустические исследования в Охотском и Японском морях проводились непрерывно в период экспедиции на ПУС «Надежда» Морского государственного университета им. Г. И. Невельского вдоль всего маршрута с 3 августа по 2 сентября 2010 г. Здесь представлен один из наиболее характерных фрагментов записи звукорассеивающих слоев, который был произведен на трассе 52 км в Охотском море в вблизи мыса Елизаветы, северная оконечность о. Сахалин.

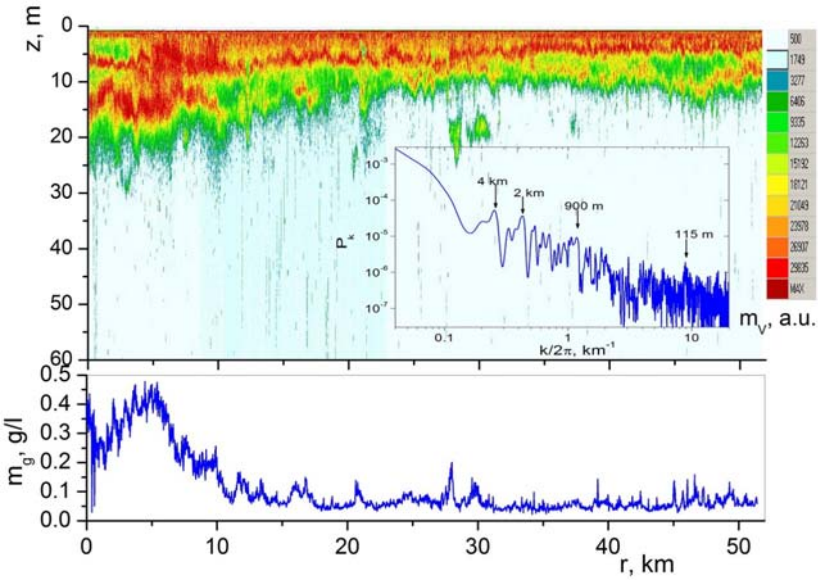

Рис. 6. Структура рассеяния звука на мелкомасштабных неоднородностях биологического происхождения на частоте 100 кГц в Охотском море в августе 2010 г. (верхний рисунок), спектр силы рассеивающего слоя вдоль трассы (на врезке вверху) и оценка распределения биомассы вдоль трассы (нижний рисунок)

Из сравнения результатов, представленных на рис. 4 и 6, видны отличия в структуре рассеяния звука, характеризующиеся более сильным звукорассеивающим слоем в Охотском море по сравнению с шельфом Японского моря. Из рис. 6 хорошо видны характерные вариации рассеяния звука, связанные с внутренними волнами, локализованными вблизи верхней и нижней границ термоклина на глубинах около 4…6 м и 10…15 м, соответственно. Из результатов, представленных на рис. 6, видно, что имеется значительная пространственная изменчивость $m_g(r)$, которая связана с характерными закономерностями распределения планктона по глубине вдоль трассы.

Модуляция последними термоклина приводит к существенным вариациям $m_g(r)$. На врезке рис. 6 представлены спектральные пики, отвечающие характерным пространственным периодам внутренних волн, распространяющихся в верхнем слое моря.

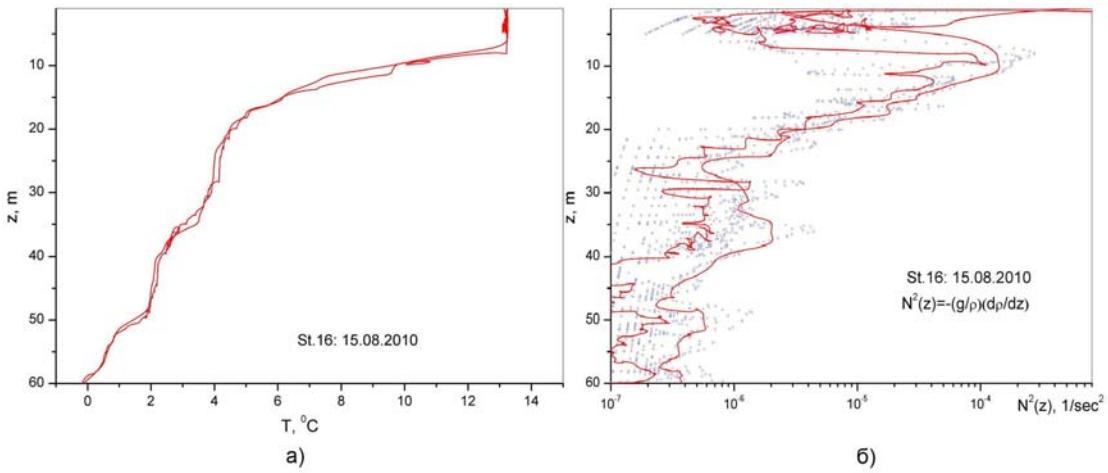

Рис. 7. а) Распределение температуры в начале трассы, показанной на рис. 6.,
б) Распределение частоты Брента-Вяйсяля $N^2(z)$ в начале трассы, показанной на рис. 6

На рис. 7 представлены распределения температуры и частоты Брента-Вяйсяля $N^2(z) = -(g/\rho)(d\rho/dz)$, измеренные в начале трассы. Видно, что распределение частоты Брента-Вяйсяля $N^2(z)$ соответстует параметрам внутренних волн, которые видны на рис. 6 для коэффициента рассеяния звука. Наиболее резкие градиенты температуры и наиболее глубокая потенциальная яма $N^2(z)$, локализующая внутренние волны, расположены до глубины около 30 метров. Именно здесь в основном и сосредоточены наибольшие значения коэффициента рассеяния звука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой для рассмотрения вопроса о связи между коэффициентом рассеяния звука m_v и распределением биомассы в морской среде явилась формула для коэффициента рассеяния, включающая различные полуэмпирические зависимости сечения рассеяния на одиночном включении и два типа функций распределения включений по размерам — степенное и гауссовское. Полученная система уравнений позволила по данным о коэффициенте рассеяния оценить важную характеристику биопродуктивности водных масс — массовую концентрацию включений и их суммарное количество в интервале размеров. Проведены сравнительные оценки концентрации планктона по данным о рассеянии звука, полученным в кругосветной экспедиции на паруснике «Надежда» в 2003–2004 гг., которые выявили характерные вариации концентрации планктона в открытых частях океана. Из полученных результатов следует обратить внимание на то, что на шельфе и в окраинных морях контрастность суточных вариаций концентрации

планктона уменьшается. Результаты, полученные в шельфовой части Японского моря и Охотском море, согласуются с характерными оценками концентрации планктона в схожих районах океана. Полученное решение, связывающее коэффициент рассеяния звука m_v и распределение биомассы в морской среде, представляет интерес для использования его в методе акустического мониторинга биоресурсов на основе рассеяния звука.

Работа была поддержана грантом государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-3641.2010.5, грантами РФФИ № 09-02-01030-а, ДВО РАН №09-I-П17-04, №09-III-А-07-314, №10-III-В-07-189.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева И. Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях // В кн.: Акустика океана, под ред. Л. М. Бреховских, М.: Наука, 1974, с. 491–558.
2. Chapman R., O. Bluy., R. Adlington, A. Robinson. Deep Scattering Layer Spectra in the Atlantic and Pacific Oceans and Adjaicent Seas // J. Acoust. Soc. Am., 1974, vol. 56, No 6, p. 1722–1734.
3. Orlowsky A. Hydroacoustic Characteristics of Scattering Layers in the Northeastern Atlantic Ocean // J. Acoust. Soc Am., 1990, vol. 88, No. 1, p. 298–309.
4. Акуличев В. А., Буланов В. А., Кленин С. А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде // Акуст. журн. 1986. Т.32. №3. С. 289–295.
5. Буланов В. А. Акустический мониторинг деятельного слоя моря // Вестник ДВО РАН. 1998. №3, с. 19–33.
6. Цейтлин В. Б. Размерное распределение пелагических организмов в тропических районах океана // Океанология. 1981. Т.21. №1, с. 125–131.
7. Акуличев В. А., Буланов В. А. Исследования неоднородностей морской среды методами акустического зондирования / В кн. 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.
8. Буланов В. А. К вопросу об оценке распределения биомассы в деятельном слое океана по данным о рассеянии звука // Подводные исследования и робототехника, №1(5). 2008. с. 58–65.
9. Андреева И. Б., Самоволькин В. Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.:Агропромиздат.1986. 104 с.
10. Stanton T. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and prolongated objects // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V.86. p. 1499–1510
11. Weibe P., Greene C., Stanton T. Sound scattering by live zooplankton and micronecton // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol.88. No 5. p. 2346–2359
12. Gorska N. Chu D. Some aspects of sound extinction by zooplankton // J. Acoust. Soc Am., 2001, vol. 110, No. 5, p. 2315–2325
13. 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 // In Proceed. of the 18th International Congress on Acoustics. ICA 2004, Kyoto, Japan. p. 2415–2422.
14. Акуличев В. А., Буланов В. А., Корсков И. В., Попов П. Н. Акустическое зондирование верхнего слоя морской воды в различных районах океана // Подводные исследования и робототехника, №2. 2006. с. 59–71.
15. Ressler P. Acoustic backscatter measurements with a 153 kHz ADCP in the northeastern Gulf of Mexico: determination of dominant zooplankton and micronekton scatterers // Deep-Sea Research I. 2002. v. 49. p. 2035–2051.