

РАССЕЯНИЕ ЗВУКА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ В ЯПОНСКОМ И ОХОТСКОМ МОРЯХ

В.А. Буланов, И.В. Корсков, А.В. Стороженко

Представлены результаты исследований рассеяния звука в Японском и Охотском морях в различные годы. Актуальность исследований связана с необходимостью создания оперативных методов проводить оценку изменчивости структуры морской среды в процессе непрерывного движения судна. Данное обстоятельство особенно важно 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. Разработан эффективный акустический метод на основе рассеяния звука, позволяющий на различных частотах проводить изучение структуры звукорассеивающих слоев, включая пузырьки, планктон, подводные газовые факелы. Измерения коэффициентов рассеяния звука проводились на ходу судна и на отдельных станциях на частотах от 12 до 100 кГц. Проведены оценки биомассы планктона вдоль длинных трасс на основе рассеяния звука. Представлены исследования рассеяния звука в подводных газовых факелах, обнаруженных на границе шельфа в Японском море. Представленные теоретические модели позволили провести оценки концентрации газа в пузырьках, образующих газовые факелы, а также оценить общее количество газа, выходящее из обнаруженных газовых факелов на шельфе Японского моря.

Ключевые слова: рассеяние звука, морская вода, пузырьки, планктон, акустическая спектроскопия, подводный газовый факел

1. Введение

Для верхнего слоя океана характерно наличие интенсивных динамических процессов и сосредоточение биоресурсов [1–3]. Большую роль в рассеянии звука играют планктонные сообщества, и в первую очередь с позиции иерархии сечения рассеяния звука одиночным объектом выступает особь зоопланктона. Фитопланктон рассеивает звук существенно слабее, однако наличие его в больших количествах порой создает конкуренцию зоопланктону в рассеянии звука на высоких частотах. Планктон обычно располагается в областях с максимальными градиентами плотности. 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 [1]. По существу, особен-

ности динамики звукорассеивающих слоев можно использовать для решения актуальной задачи диагностики океана – проведения оперативной оценки характера процессов в толще океана непосредственно на ходу судна акустическими методами.

Имеются математические модели для расчета рассеяния на достаточно больших и сложных по форме объектах, например, на слабо изогнутых цилиндрах конечной длины [2, 3]. В этом случае удастся оценить коэффициент рассеяния не только рыбами и планктоном малого размера (меньше длины волны звука), но и большими рыбами и зоопланктоном, наиболее сильно рассеивающими звук. Выяснилось, что на высоких частотах звука основное рассеяние звука имеет биологическое происхождение и значительная часть его связана с распределением планктона в морской воде [1, 2, 4, 5].

Наличие флуктуаций гидрофизических параметров среды за счет турбулентности и других механизмов также приводит к усилению рассеяния звука [6, 7]. Приповерхностный слой океана наиболее сильно

характеризуется развитой турбулентностью, аномально высокими концентрациями газовых пузырьков, газонасыщенностью воды и большим газообменом между океаном и атмосферой [8–10]. В 1980-х гг. были открыты новые объекты в океане – подводные газовые (пузырьковые) факелы, образованные газовыми пузырьками, выходящими из дна моря [11–17]. Подводные газовые факелы (ГФ) повсеместно встречаются в районах выброса газов вблизи подводных грязевых вулканических образований, подводных газовых и нефтяных месторождений, подводных залежей газогидратов в толще морских осадков и др. Большую роль для обнаружения ГФ и изучения их структуры играют акустические методы зондирования на основе обратного рассеяния звука [18, 19].

Цель настоящей работы – анализ результатов экспериментальных исследований рассеяния звука в дальневосточных морях, на основе которых с учетом теоретических моделей провести оценки распределения биомассы планктона в верхнем слое, а также оценки концентрации газа в газовых факелах, обнаруженных на границе шельфа в Японском море. Предварительно перед проведением экспериментальных исследований авторам пришлось решать практические задачи по использованию гидроакустических излучателей эхолотов, составляющих научное оборудование судна, но уже вышедших из строя и непригодных для использования в штатном режиме. В статье показано, что они могут быть использованы для научных исследований в качестве подключаемых самостоятельных источников звука к специально разработанной задающей и приемной аппаратуре для регистрации слабых сигналов обратного рассеяния звука.

2. Методы и материалы

2.1. Теоретические основы для оценки распределения планктона и пузырьков на основе рассеяния звука

Коэффициент объемного рассеяния звука m_V определяется выражением, учитывающим функцию распределения по размерам $g(R)$ и сечение рассеяния $\sigma(R, \omega)$ одиночным включением, и экспериментально $m_V|_{\text{exp}}$ может быть измерен с помощью следующей формулы [1, 2, 7]:

$$m_V = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma(R, \omega) g(R) dR = m_V|_{\text{exp}} \approx (2 / \pi \theta^2 c \tau) (P_{bs} / P_i)^2, \quad (1)$$

где $I_{bs} \sim P_{bs}^2$, $I_i \sim P_i^2$ – интенсивности падающего на неоднородность и рассеянного звука соответствен-

но, при этом P_i и P_{bs} – соответственно, амплитуды падающей на объем V волны и волны, рассеянной в обратном направлении, V – импульсный рассеивающий объем среды, $V = \pi r^2 \theta^2 c \tau / 2$, где θ – ширина диаграммы направленности излучателя, c – скорость звука, τ – длина импульса звука, $\sigma(R, \omega)$ обычно задают в m^2 , и тогда размерность коэффициента m_V определяется как m^{-1} .

С помощью формулы (1) можно экспериментально определить функцию распределения по размерам $g(R)$ или объемную концентрацию:

$$x = (4\pi / 3) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^3 g(R, r) dR. \quad (2)$$

Имея объемную концентрацию включений, можно определить массовую концентрацию по формуле [7, 20]:

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

где $\rho'(r)$ – плотность включений в различных точках пространства. Общее выражение, позволяющее получать данные по распределению биомассы в рамках степенного P и гауссовского G распределений, имеет вид [7, 20]:

$$m_g^{(P,G)}(r, f) = D^{(P,G)}(f) m_V(r, f), \quad (4)$$

где коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ подробно проанализирован в работах [20–22]:

$$D^{(P,G)}(f) = \begin{cases} \frac{4\pi\rho'}{3(4-n)} \frac{R_{\max}^{4-n}}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_1(R, f) R^{-n} dR}, \\ g^{(P)} \sim R^{-n} \\ \frac{4\pi\rho'}{3} \frac{\bar{R}^3}{\sigma_1(\bar{R}, f)}, \\ g^{(G)} \sim e^{\left[-\frac{(R-\bar{R}(r))^2}{\Delta^2}\right]}. \end{cases} \quad (5)$$

Следует обратить внимание на зависимость от частоты f , которая появляется в формулах (4), (5) через частотную зависимость сечения рассеяния на одиночном включении $\sigma_1(R, f)$.

В случае, когда наблюдается рассеяние на пузырьках, можно определить функцию распределения пузырьков по размерам $g(R)$, связанную с количеством пузырьков в единице объема (концентрацией пузырьков):

$$N = \int_0^\infty g(R) dR, \quad (6)$$

а также объемную концентрацию газа в пузырьках x [7]. Функция распределения пузырьков по размерам $g(R)$ может быть найдена по частотной зависимости

коэффициента рассеяния звука $m_v(\omega)$ в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта [4, 7–10]:

$$R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0(1 + 0.1z) / \rho} / \omega, \quad (7)$$

где P_0 – гидростатическое давление на поверхности моря, z – глубина в метрах, ρ – плотность воды, γ – постоянная адиабаты газа внутри пузырька, для двухатомного газа $\gamma \approx 1.4$. Варьируя частоты, можно определить функцию распределения пузырьков по размерам в виде

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta}{\pi R^3(\omega)} m_v(\omega), \quad (8)$$

где $\delta \approx 0.1$ – коэффициент затухания пузырьков на резонансе. Формула (8) наиболее часто используется в области высоких частот, соответствующих резонансному рассеянию на маленьких пузырьках. На низких частотах часто наблюдается нерезонансное рассеяние, которое наиболее ярко проявляется на пузырьках, составляющих подводные газовые факелы. Вклад нерезонансного фона при рассеянии звука можно определить, используя выражение для амплитуды рассеяния в виде:

$$f(R) = R / \left[(R_\omega / R)^2 - 1 - i\delta \right]. \quad (9)$$

Тогда в случае достаточно узкой функции распределения пузырьков, например гауссовского типа, в виде

$$g(R) = A_g \exp[-(R - \bar{R})^2 / \sigma_R^2], \quad (10)$$

где \bar{R} – средний размер пузырьков, σ_R – средний разброс размеров, получаем $A_g = 2N / \sqrt{\pi} \sigma_R$. Используя общее определение для коэффициента рассеяния [7] $m_v = \int_0^\infty |f(R)|^2 g(R) dR$, можно получить выражение для коэффициента нерезонансного рассеяния в виде

$$m_v = A_g \sqrt{\pi / 2} \sigma_R \bar{R}^2 = N \bar{R}^2. \quad (11)$$

Вводя объемную концентрацию газа в пузырьках в виде (2), можно выразить объемную концентрацию x через параметры рассеяния звука, концентрацию пузырьков и средний размер пузырьков в ГФ в виде:

$$x = (4\pi / 3) m_v \bar{R} \approx (4\pi / 3) N \bar{R}^3. \quad (12)$$

Наличие негауссовской функции распределения пузырьков по размерам приводит к задаче одновременного учета резонансного и нерезонансного рассеяния на пузырьках, которая решается методами

нестационарного рассеяния звука импульсами различной длительности [7, 23]. Также для оценок можно использовать распределения пузырьков в рамках моделей с подгоночными параметрами [7, 24], измененными в эксперименте. Для этого была выбрана функция $g(R)$ вида [7]:

$$g(R) = A_g R^{-n_1} \exp\left\{-n_2 \left[(R_p / R) + (R / R_m) \right]\right\}. \quad (13)$$

При этом оказывается, что $A_g \approx 10^{-8} \text{ см } n_1^{-4}$, $n_1 \sim n_2 \approx 3.5 \div 4$ [7–10] при измерениях $g(R)$ в умеренных состояниях моря. Параметры R_p и R_m отвечают соответственно максимуму $g(R)$ и максимальному размеру пузырьков. В качестве этих параметров для пузырьковых облаков в приповерхностных слоях моря выбирают значения $R_p = 0.01$ мм, $R_m = 7$ мм [7, 23].

2.2. Экспериментальные методы и аппаратура

Мелкомасштабные неоднородности обычно локализованы в окрестности пикноклина и во многих случаях выполняют роль трассера, подчеркивающего гидрофизические вариации в толще океана. Для изучения структуры и динамических характеристик водной толщи важным являлось проведение измерений рассеяния звука в морской толще вдоль длинных трасс, которые реализуются при непрерывных измерениях вдоль всего маршрута следования судна.

Особенностью проведенных исследований было использование гидроакустических излучателей эхолотов, составляющих научное оборудование судна, но уже вышедших из строя и непригодных для использования в штатном режиме. Одной из задач было подключение к излучателям своей задающей и приемной аппаратуры, которая бы смогла решить задачи штатного эхолота, а также использование таких излучателей, встроенных в днище судна с минимумом шумов обтекания, для проведения исследовательских работ. Были подготовлены и апробированы акустические системы для проведения исследований по изучению рассеяния звука вдоль длинных трасс в Японском море, пересекающих как крупномасштабные неоднородности (фронты, вихри, внутренние волны) так и проходящих через резкую границу шельфа с глубоким морем. Так, для работы на частоте 12 кГц использовались задающая и регистрирующая аппаратура лаборатории гидрофизики ТОИ ДВО РАН и излучатель глубоководного эхолота ГЭЛ-3, вмонтированный в днище судна, что позволяло проводить непрерывное зондирование моря непосредственно на ходу судна.

На рис. 1 показана функциональная схема аппаратного комплекса для измерения на частоте 12 кГц.



Рис. 1. Функциональная схема аппаратного комплекса для измерения рассеяния звука на различных частотах

Генератор синхроимпульсов задавал интервалы между посылками импульсов. В зависимости от глубины места интервалы менялись от 1 до 3.7 с. Генератор сигналов ГСПФ-053 формировал импульсы с частотой 12 кГц длительностью от 1 до 4 мс. Для усиления сигналов использовался либо усилитель мощности фирмы Behringer, NX6000D мощностью 6 кВт, либо усилитель мощности QSC RMX 5050 мощностью 5 кВт.

Излучатель ГЭЛ-3 имеет характеристику направленности 10^0 , чувствительность на приеме 300 мкВ/Па. В основу приемного тракта входил селективный нановольтметр SN 233, который обеспечивал усиление 10^4 при фильтрации сигналов в зависимости от длительности импульсов и дальности в различных частотных полосах 54, 36 и 18 дБ/октаву, усиленный сигнал оцифровывался 12-разрядной АЦП L873 фирмы Л-Кард (Москва) с максимальной частотой оцифровки до 1.3 МГц, а также с помощью 14-разрядной АЦП Ла2-USB фирмы «Руднев и Шиляев» (Москва). Такова была форма использования ГЭЛ-3 в экспедиционных исследованиях в рейсах № 81 и 83 НИС «Профессор Гагаринский» в августе и октябре 2022 г. Ранее в рейсе № 29 НИС «Профессор Гагаринский» в июле 2000 г. излучение с ГЭЛ-3 проходило в штатном режиме работы эхолота, использовалась только приемная система регистрации, которая осуществлялась с помощью АЦП ADS1B (Digital Systems, China).

Для излучения на различных частотах в интервале от 25 до 200 кГц использовался также много-частотный эхолот Furuno FCV 1150 мощностью до 2 кВт. К сожалению, эхолот FCV 1150 в основном предназначен для рыбопоисковых целей и не позволяет простыми методами осуществлять управляемую запись сигналов рассеяния звука, поэтому была

использована своя схема регистрации и записи принятых сигналов, которая в общих чертах совпадает со схемой, представленной на рис. 1. Данная схема использовалась в рейсе № 61 НИС «Академик Опарин» в ноябре 2020 г. в Японском море и Татарском проливе [25] и в рейсе № 61 НИС «Академик М.А.Лаврентьев» в апреле–мае 2020 г. в Японском и Охотском морях [26].

В ряде экспедиций удавалось использовать встроенные в корпус судна высокочастотные излучатели с частотами 100 кГц (рейс № 29 НИС «Профессор Гагаринский» в июле 2000 г) или 200 кГц (рейс № 61 НИС «Академик Опарин» в ноябре 2020 г.). Для выполнения работ по изучению рассеяния на указанных частотах использовался блок излучения стандартного эхолота Furuno или блок излучения и приема БИП, специально разработанный в лаборатории гидрофизики ТОИ ДВО РАН. Блок БИП позволял обеспечить излучение на высокой частоте с напряжением до 500 В в импульсе длиной до 2.5 мс и ранее неоднократно использовался в экспедиционных работах [27]. Прием во всех случаях проводился с помощью аппаратуры, разработанной в ТОИ. В приемных трактах использовались селективные усилители фирмы UNIPAN типа селективного нановольтметра SN-233, обладающего широким диапазоном усиления (от 10 до 10^6) и высокой селективностью (ослабление сигнала вне полосы пропускания 54 дБ/октаву) в диапазоне частот 3 Гц–150 кГц. Кроме того, использовался широкополосный усилитель SN-232, также обладающий широким диапазоном усиления (от 10 до 10^6). Использование высокочастотных сигналов с применением блока БИП соответствует схеме, изображенной на рис. 1, где вместо усилителя мощности NX6000D надо поставить блок БИП.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Результаты исследований рассеяния звука в северной части Японского моря и центральной части Охотского моря

Изучение рассеяния звука в верхнем слое океана является традиционной темой в морских исследованиях [1, 2]. Особый интерес представляют исследования в дальневосточных морях, в которых

наблюдается высокая изменчивость структуры звукорассеивающих слоев. Одновременно с пространственной изменчивостью рассеяния звука обычно наблюдаются суточные вариации звукорассеивающих слоев, которые в темное время суток поднимаются к поверхности.

В качестве примера на рис. 2 приведены распределения коэффициента рассеяния звука на частоте 12 кГц в относительных единицах, полученные в рейсе № 61 НИС «Академик Опарин» в осенний период [25] вдоль границы шельфа Приморья на расстоянии около 360 км в северной части Японского моря.

Из рис. 2 видно, что до глубины 100–150 м повсеместно наблюдаются области с высоким коэффициентом рассеяния звука, которые связаны с наличием мелкомасштабных неоднородностей в толще воды (в основном рыба и зоопланктон). Интересно, что суточные вариации коэффициента рассеяния звука оказались сравнительно небольшими. На рис. 2 видно более сильное рассеяние в ночной период от 8 час до 18 ч, по сравнению с более слабыми значениями m_v в остальные светлые периоды суток. Вместе с тем на протяжении всей трассы наблюдается высокая изменчивость коэффициента рассеяния звука, которая определенно выявляет сложную структуру рассеяния с некоторыми наиболее значимыми периодами при следовании судна вдоль трассы. Даже без специального анализа из рис. 2 виден один из характерных периодов, составляющий время около 1 ч. При учете средней скорости судна около 9–10 узлов это составляет величину пространственной изменчивости структуры ЗРС около 15 км.

На рис. 3 показано распределение рассеяния звука на частоте 25 кГц в северной части Японского моря, полученное в рейсе №92 НИС «Академик М.А.Лаврентьев» [26] в конце мая 2021 г. вдоль трассы протяженностью около 300 км. Начало трассы было в точке с координатами 45°6858 с.ш., 140°2610 в.д. В отличие от результатов, представленных на рис. 2, указанные результаты были получены при рассеянии звука на частоте 25 кГц и зарегистрированы вдоль трассы, располагающейся в центральной глубоководной части Японского моря, при этом результаты получены в весенний период. Хорошо видно, что мощность и структура рассеяния звука на рис. 2 и рис. 3 существенно различаются. Последнее объясняется как различием расположения трасс – близость шельфа для одной трассы и средняя часть моря для другой, так и сезонными различиями изменения концентрации зоопланктона [1, 2] (соответственно осень и весна). Однако важным обстоятельством при получении результатов может быть различие по частоте

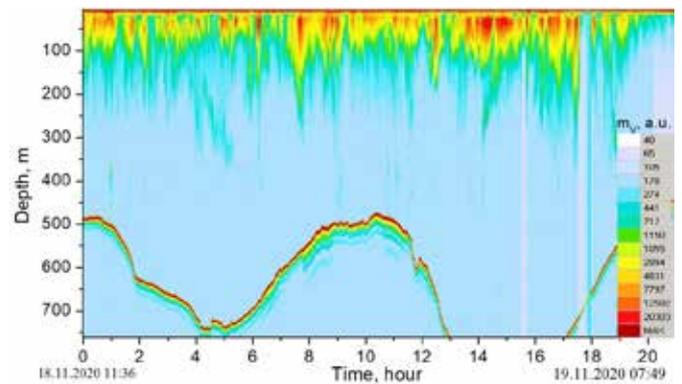


Рис. 2. Рассеяние звука на частоте 12 кГц с 11:36 18.11.20 г. по 09:49 19.11.20 г. в северной части Японского моря (для удобства восприятия суточной изменчивости вдоль трассы протяженностью 360 км показано текущее время регистрации)

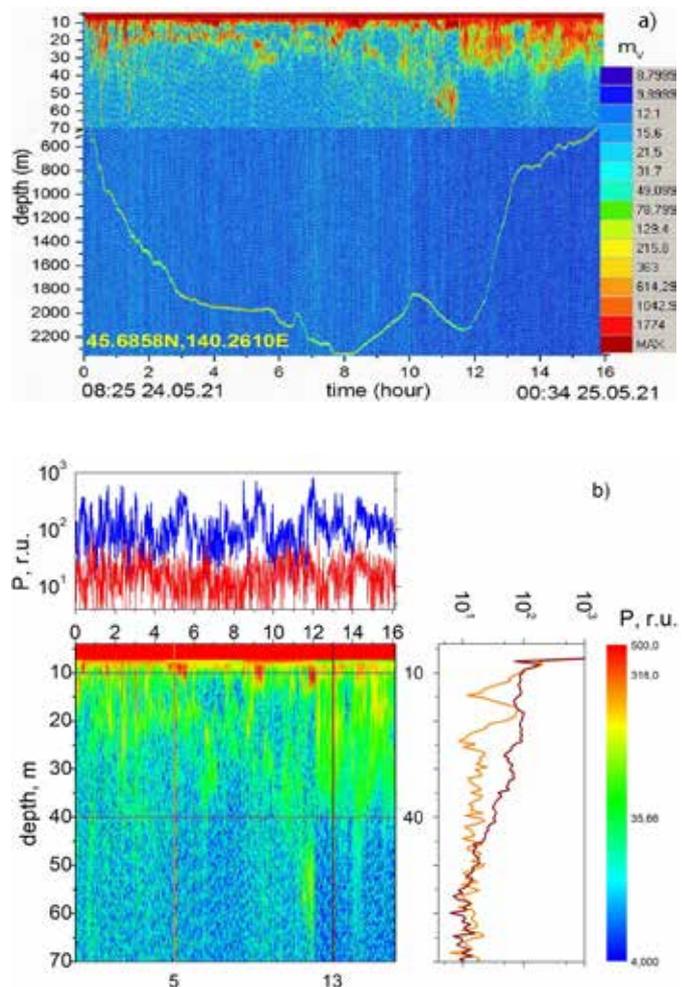


Рис. 3. Рассеяние звука на частоте 25 кГц в северной части Японского моря: а – общая картина распределения коэффициента рассеяния звука m_v , в верхней части подробно показано распределение m_v в верхнем слое; б – распределение давления P в относительных единицах в рассеянном поле, на дополнительных панелях показаны горизонтальные (на глубинах 10 и 40 м) и вертикальные распределения рассеяния в различных структурах (при $t=5$ ч и $t=13$ ч.)

примерно в 2 раза. Следует отметить, что именно в этой области частот происходит переход от рассеяния на стаях рыб, типичных для относительно небольших частот килогерцового диапазон, к преобладающему механизму рассеяния звука на зоопланктоне [1, 2]. Во второй части рис. 3, отвечающей ночному периоду, видно небольшое усиление рассеяния звука, связанное с суточными вариациями планктона. В то же время структура рассеяния звука, представленная на рис. 3, не показывает столь явного резко выраженного изменения коэффициента рассеяния на определенных масштабах по времени, как это видно на рис.2. Так, рассеяние звука на глубине 10 м выявляет периодичность, составляющую около 2–3 часов, в то время как рассеяние звука на глубине 40 м оказывается практически однородным.

Наряду с изучением рассеяния звука в Японском море со своими характерными механизмами представляет интерес проведение акустического зондирования в Охотском море. На рис. 4 показано типичное распределение рассеяния звука на частоте 25 кГц вдоль трассы протяженностью около 430 км в течение суток при прохождении наиболее глубокой части Охотского моря (рейс № 92 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»). Координаты середины трассы с подводной горой высотой около 1 км показаны на рисунке: 46°46'14 с.ш., 149°51'41 в.д.

Следует обратить внимание, что на данной трассе не было обнаружено ярко выраженных изменений коэффициента рассеяния звука, связанного с суточными вариациями по глубине планктона и других биологических объектов. Вместе с тем картина рассеяния звука обнаруживает спектральную структуру,

которая выявляет несколько масштабов. Они оказываются близки к тем масштабам, которые были выявлены вдоль трасс в Японском море и составляли величины около 15–20 км и около 3–5 км.

Таким образом, при акустическом зондировании вдоль различных трасс в Японском и Охотском морях выявлено наличие сложной пространственной структуры рассеяния звука, которая, тем не менее, позволяет выделить два наиболее характерных масштаба: крупномасштабные изменения на расстояниях 15–30 км и мелкомасштабные изменения, ограниченные сверху величиной около 3–5 км. Предположительно, природа крупномасштабных структур в рассеянии звука связана с мезомасштабной изменчивостью морской среды, обусловленной наличием структур типа мезомасштабных вихрей [28–30]. Мелкомасштабные вариации рассеяния звука, скорее всего, вызваны присутствием длинных внутренних волн, которые часто проявляются в экспериментах по рассеянию звука.

3.2. Оценка биомассы планктона в верхней части моря

Экспериментальные данные по коэффициентам рассеяния звука позволяют провести оценку биомассы, распределенной в скоплениях зоопланктона и мелкой рыбы. Это можно выполнить, используя формулы (2)–(5). Для расчетов часто используют характерные значения размеров зоопланктона, взятые из работ [28–33], преобладающий размер которых полагают равным $R=0.1$ см. Проведенные расчеты показали, что при размерах рассеивающих объектов

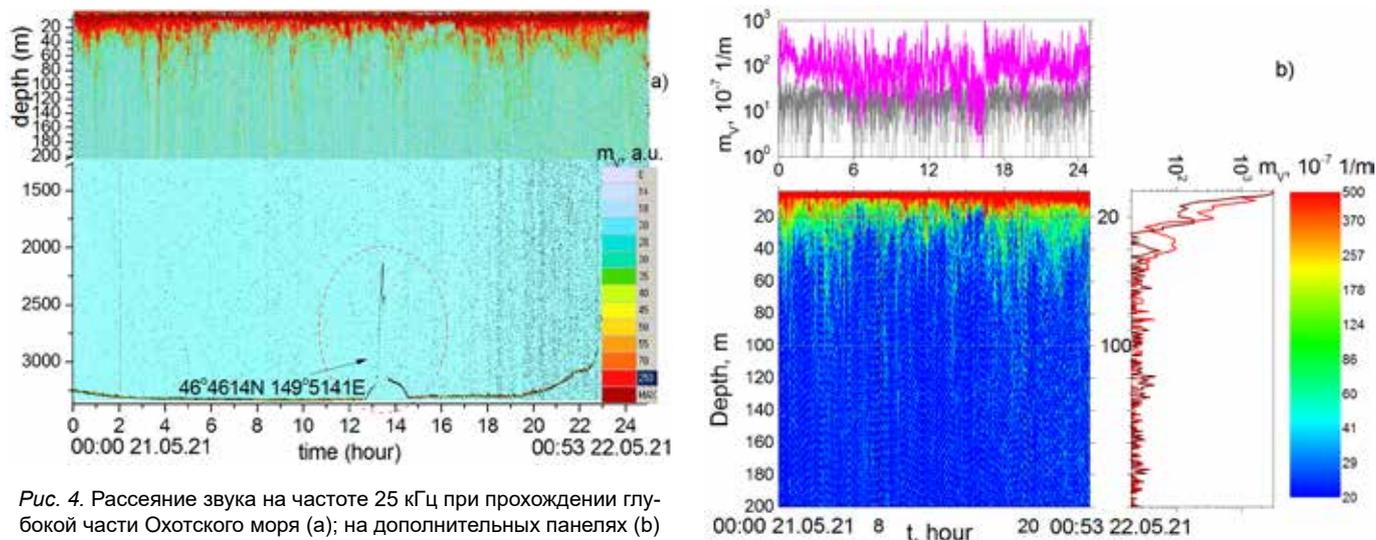


Рис. 4. Рассеяние звука на частоте 25 кГц при прохождении глубокой части Охотского моря (а); на дополнительных панелях (б) показаны горизонтальные (на глубинах 20 и 100 м) и вертикальные распределения коэффициента рассеяния m_v в различных структурах (при $t=8$ и $t=20$ ч)

от $R \sim 0,05$ до $0,4$ см оба вида зависимостей функции распределения, содержащейся в формуле (5), дают одинаковый порядок величины объемной концентрации включений. При этом, проделанные оценки показывают, что для объектов больших размеров от $R \sim 1$ до 5 см значения объемных концентраций являются пренебрежимо малыми: $x \sim 10^{-15}$.

Интересно сравнить данные по рассеянию звука в Охотском море на различных частотах. На рис. 5 представлены данные по рассеянию звука на частоте 100 кГц на трассе 52 км в Охотском море (вблизи мыса Елизаветы, северная оконечность о-ва Сахалин). Из рис. 5 хорошо видны характерные вариации рассеяния звука, связанные с внутренними волнами, локализованными вблизи верхней и нижних границ термоклина на глубинах около $4\text{--}6$ м и $10\text{--}15$ м соответственно. На врезке рис. 5 представлены спектральные пики, отвечающие характерным пространственным периодам внутренних волн, распространяющихся в верхнем слое моря.

Известно [1], что коэффициент рассеяния звука в море имеет высокие значения не только в верхнем слое моря, но также в придонных слоях и вблизи подводных возвышенностей. На рис. 6 представлена картина рассеяния звука на частоте 25 кГц до глубины 185 метров на расстоянии 48 км вдоль трассы вблизи о. Парамушир и о. Атласова (Курильские острова) Охотского моря. Хорошо видно локализованное рассеяние звука на ЗРС вблизи дна подводной возвышенности ($50^{\circ}38$ с.ш., $155^{\circ}30$ в.д.), вызванное стаями рыбы. В правой стороне графика видна структура более слабого рассеяния звука, вызванная зоопланктоном, который подчеркивает структуру внутренней волны с амплитудой около $30\text{--}40$ м и длиной волны около 5 км.

Из рис. 6 видно, что вблизи подводной возвышенности биомасса распределена в достаточно широком слое $h \sim 50\text{--}60$ м, сравнимом с глубиной до дна около 100 м. Прделанные формальные оценки биомассы по указанным выше моделям зоопланктона [2, 3, 21, 22] показали, что значение $m_g(r)$ в облаке ЗРС изменяется в широких пределах, значительно более 2 г/л. Эти величины на порядки превышают величины, представленные на рис. 5 для распределения зоопланктона на шельфе вблизи побережья северного Сахалина. Безусловно, приведенная оценка не пригодна для оценки биомассы в ЗРС на рис. 6, которая обусловлена большим сосредоточением рыбы. Для этого следует использовать другие модели рассеяния звука как на одиночных особях, так и в плотных облаках рассеивателей [1, 32]. Простое приближение борновского рассеяния для структур, изображенных

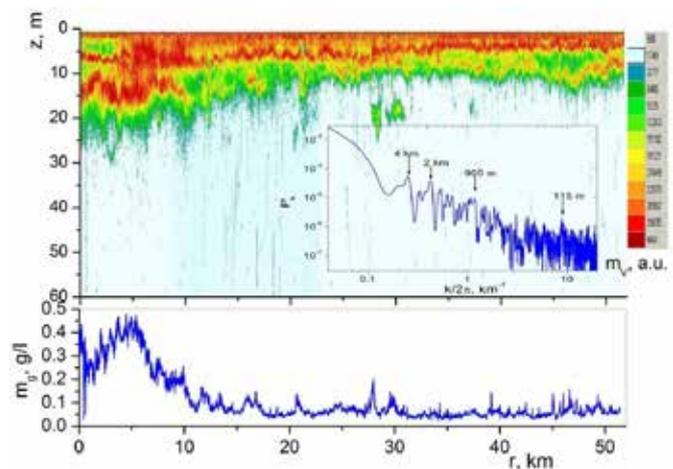


Рис. 5. Структура рассеяния звука на мелкомасштабных неоднородностях биологического происхождения на частоте 100 кГц в Охотском море в августе 2010 г. (верхний рисунок), спектр силы рассеивающего слоя вдоль трассы (на врезке вверху) и оценка распределения биомассы вдоль трассы (нижний рисунок)

на рис. 5, неприменимо и, к сожалению, достаточно корректные модели многократного рассеяния в условиях существенной перекрываемости сечений рассеяния на отдельных рассеивателях отсутствуют в настоящее время [1, 3]. Именно такого рода структура изображена на рис. 6 вблизи подводной возвышенности. В этих условиях требуется дополнительное установление полуэмпирических связей с данными биологических обловов рыбы *in situ* и применение в дальнейшем подобных связей.

Таким образом, полученные результаты измерений коэффициента объемного рассеяния высокочастотного звука свидетельствуют о том, что распределение биомассы в верхнем слое океана при достаточной разреженности можно оценивать непосредственно на ходу судна с хорошим пространственным разрешением. В более плотных облаках

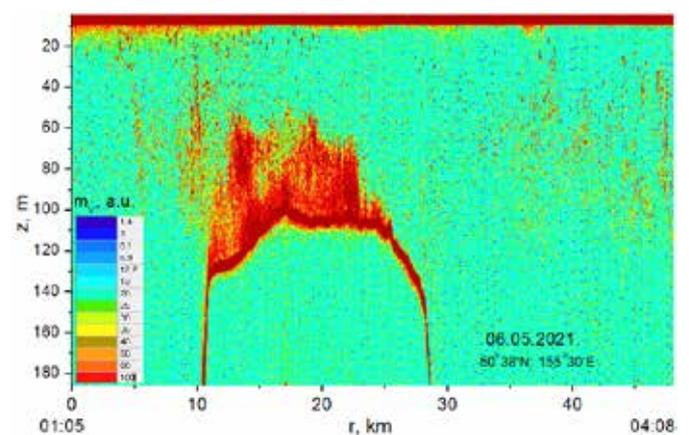


Рис. 6. Рассеяние звука на частоте 25 кГц вдоль трассы вблизи о-ва Атласова (Курильские острова) Охотского моря

рассеивателей требуются дополнительные экспериментальные данные, получаемые *in situ*. Акустическая оценка на ходу судна распределения биомассы при больших концентрациях пока не возможна без дополнительных обловов биомассы.

3.3. Рассеяние звука на подводных пузырьковых факелах на шельфе Японского моря

Как известно [11–17], подводные газовые (пузырьковые) факелы (ГФ) часто встречаются вблизи границы шельфа в различных районах океана. Большое количество ГФ было обнаружено в Охотском море вблизи о-ва Сахалин и вблизи Курильских островов [12, 16, 18]. В Японском море ГФ встречаются не столь часто. В экспедиции НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 29, 2000 г.) впервые ГФ были зарегистрированы с использованием рассеяния звука на частоте 12.4 кГц недалеко от морской экспериментальной станции на мысе Шульца ТОИ ДВО РАН, располагающейся в бухте Витязь залива Петра Великого.

На рис. 7 показано типичное рассеяние звука на ГФ, полученное 15.07.2000 г. на НИС «Профессор Гагаринский». Во врезке на рис. 7 показана схема

маршрута судна от бухты Витязь (МЭС ТОИ ДВО РАН) через область расположения ГФ.

На рис. 8 показаны гидрологические характеристики состояния моря вблизи района выхода ГФ. Видно, что в верхнем слое до глубины 40–60 м наблюдается градиент параметров среды (температуры, солёности, скорости звука), которые, как видно из рис. 7, проявляются в значительном повышении коэффициента рассеяния m_r .

Осенью 2022 г. в экспедиции на НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 83, 20–23.10.2022 г.) было вновь проведено исследование акустическими методами ГФ в данном районе шельфа Японского моря. На рис. 9 представлена схема расположения подводных газовых факелов, зарегистрированных с помощью рассеяния звука на частоте 12.4 кГц. Имеется подробная информация по координатам каждого факела. Наблюдалось большое количество факелов, которые располагались достаточно компактно. На рис. 10 представлена акустическая визуализация одиночных ГФ. Таким образом, в указанном районе

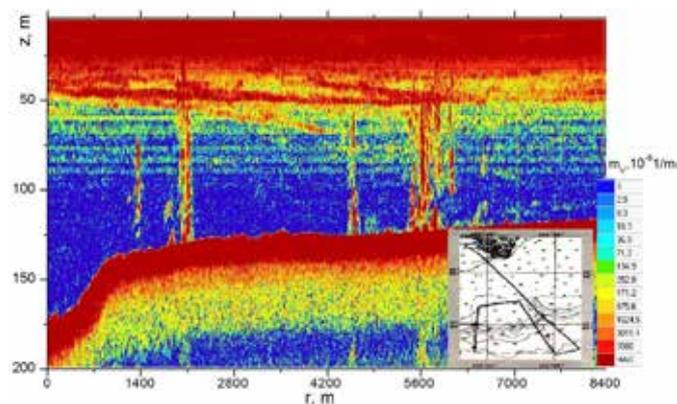


Рис. 7. Рассеяние звука на ГФ на шельфе Японского моря (15.07.2000 г., рейс № 29 НИС «Профессор Гагаринский»). Частота звука 12.4 кГц

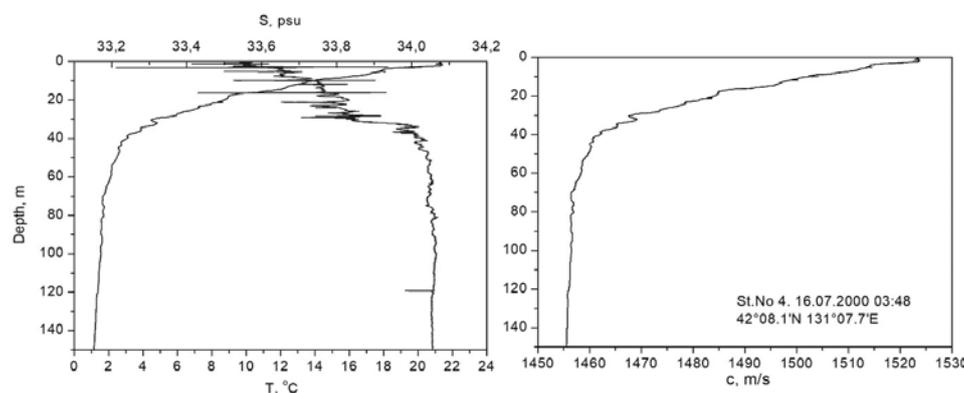


Рис. 8. Распределение температуры, солёности, скорости звука в море в районе выхода ГФ (станция № 4 16.07.2000, 03:48, 29-й рейс НИС «Профессор Гагаринский»)

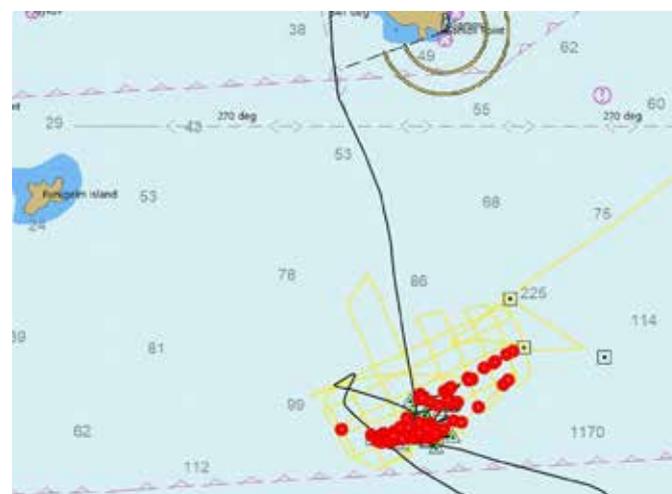


Рис. 9. Общая схема расположения подводных газовых факелов, зарегистрированных с помощью рассеяния звука на частоте 12.4 кГц в заливе Петра Великого Японского моря в период 20–23.10.2022 г.

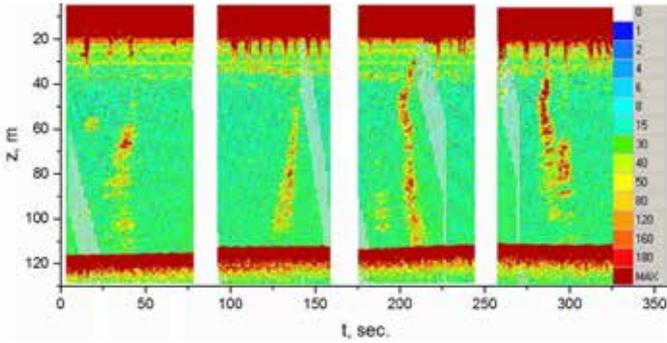


Рис. 10. Акустическое изображение одиночных ГФ на частоте 12.4 кГц в заливе Петра Великого Японского моря в период 20–23.10.2022 г.

пузырьковые факелы наблюдаются в течение длительного периода. Можно оценить их вклад в долю переноса газа через поверхность океана в атмосферу, который показан ниже.

3.4. Акустическая оценка характеристик подводных пузырьковых факелов на шельфе Японского моря

Актуальным является разработка акустических методов, позволяющих обнаруживать и выполнять оценки характеристик ГФ дистанционно на ходу судна. Выше на рис. 7 показано акустическое изображение ГФ, полученное 15.07.2000 г. на НИС «Профессор Гагаринский». На рис. 11 представлена визуализация ГФ, полученная методом акустического рассеяния в заливе Петра Великого Японского моря в период 20–23.10.2022 г.

Выполним оценки выхода газа в пузырьковых ГФ. Будем считать, что вблизи поверхности моря типичные пузырьки, составляющие ГФ, имеют достаточно большие размеры 0.5–7 мм [15, 16]. Это соответствует резонансным частотам от 460 Гц до 6.4 кГц, при

этом максимум распределения при $R = 4$ мм отвечает частоте 800 Гц. Учитывая зависимость от глубины в формуле (7), можно видеть, что на большой глубине резонанс смещается в сторону увеличения частоты. В итоге, например, на глубине 100 м на частоте 12 кГц могут испытывать резонанс достаточно большие пузырьки с размерами 0.9 мм, которые уже входят в спектральный диапазон пузырьков ГФ. Таким образом, можно определить функцию распределения пузырьков по размерам $g(R)$ по формуле (8). Затем вычисляем концентрацию числа пузырьков $N_\omega = \int g(R_\omega) dR_\omega$ и объемную концентрацию $x_\omega = (4\pi/3) \int R_\omega^3 g(R_\omega) dR_\omega$. Получаем следующий результат:

$$N_\omega = 2(m_v)_\omega \delta^2 / (\pi R_\omega^2), \quad x_\omega = 8(m_v)_\omega R_\omega \delta / 3. \quad (14)$$

Вклад нерезонансного фона при рассеянии звука можно оценить в предположении достаточно узкого распределения пузырьков, используя выражения (9)–(12). Тогда получается выражение для коэффициента нерезонансного рассеяния m_v в виде формулы (11). В итоге по результатам нерезонансного рассеяния можно определить количество пузырьков N в единице объема со средним размером \bar{R} , а также объемную концентрацию газа в пузырьках в виде формулы (12).

На рис. 12 представлена зависимость концентрации резонансных и нерезонансных пузырьков вблизи дна в ГФ вдоль трассы протяженностью около 1 км, зарегистрированные в течение 850 с на частоте 12.4 кГц. Видно, что наблюдается достаточно высокая концентрация пузырьков, которая легко регистрируется вдоль всей трассы. На врезке показано отношение вклада резонансных к нерезонансным пузырькам. Взяв отношение нерезонансных и резонансных величин, получаем соотношения $N / N_\omega = \pi / (2\delta^2)(R_\omega / \bar{R})^2$,

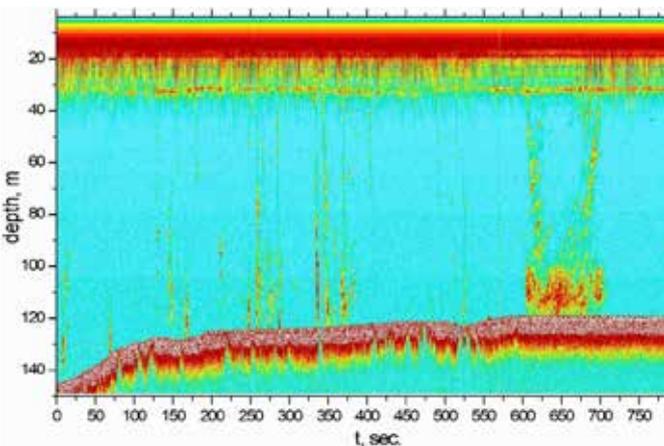


Рис. 11. Акустическая визуализация подводных пузырьковых факелов (шельф Японского моря, частота 12.4 кГц)

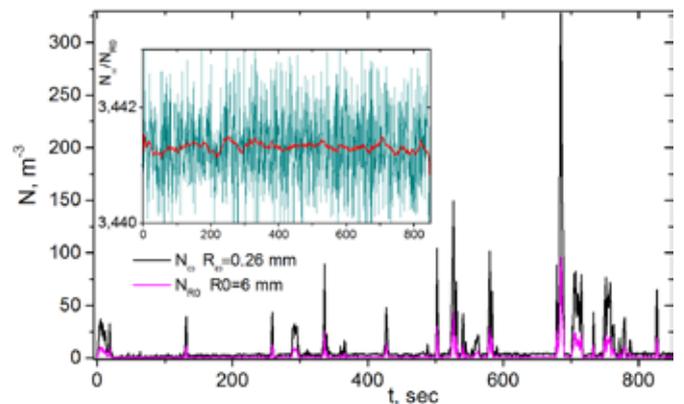


Рис. 12. Концентрация резонансных и нерезонансных пузырьков в ГФ вблизи дна вдоль трассы на частоте 12.4 кГц. На врезке отношение вклада резонансных к нерезонансным пузырькам

$x / x_0 = (\pi / 2\delta)(\bar{R} / R_0)$. Из полученных соотношений следует оценка $N_0 / N \sim 3.4$, свидетельствующая о преобладании вклада резонансного рассеяния звука на пузырьках в ГФ.

Таким образом, основной вклад вблизи дна в результаты вносит резонансное рассеяние, позволяющее делать оценки коэффициента рассеяния звука, количества пузырьков и т.д. при зондировании на частоте 12.4 кГц. В этом отношении результат отличается от случая зондирования глубоководных ГФ в Охотском море в экспедиции НИС «Академик М. Лаврентьев» (рейс № 92, 2021 г.) на частоте 25 кГц, где основной вклад вносило нерезонансное рассеяние [24].

В заключение сделаем оценки интегрального выхода газа в ГФ. Используем данные о концентрации пузырьков $N(z, r)$ в каждой точке трассы. Прежде всего, используя формулу (14), получим среднюю по глубине концентрацию пузырьков в каждой точке трассы по формуле $\bar{N}(r) = (1 / h(r)) \int_0^{h(r)} N(z, r) dz$, где $h(r)$ – глубина моря. Предполагаем, что отклик пузырьков из ГФ сосредоточен в пределах характеристики направленности излучателя θ . Получаем в каждой точке по трассе площадь поперечного сечения захвата пузырьков в виде $S(r) \approx \pi h^2(r) \theta / 2$. Зная скорость движения судна U , определяем скорость изменения количества регистрируемых пузырьков в виде $\dot{N}(r) = \bar{N}(r) S(r) U(r)$. В нашем случае мы используем переменную время t , которое с учетом движения судна U определяет положение вдоль трассы r . Общее количество пузырьков, которое будет зарегистрировано вдоль трассы за время T , с учетом \dot{N} определяется в виде

$$N_\Sigma = \int_0^T \bar{N}(t) S(t) U(t) dt. \quad (15)$$

Аналогично можно найти общий объем и массу газа, сосредоточенного в пузырьках. Если предполагать, что основу содержимого пузырьков составляет метан, можно с учетом (14) написать для относительной массы газа в пузырьках, регистрируемых в каждой точке пространства:

$$\begin{aligned} M(r, z) &= (4\pi / 3) R^3 N(r, z) \rho'(r, z) = \\ &= (8 / 3) R_0(r, z) m_V(r, z) \delta_0^2 \rho'(r, z). \end{aligned}$$

Плотность газа в пузырьках зависит от давления, и при одинаковой температуре можно написать $\rho'(r, z) \approx \rho'_0(1 + az)$, где $a \approx 0.1$ 1/м, при этом в соответствии с формулой (7) следует учесть зависимость $R_0(r, z) = R_0(r, 0) \sqrt{1 + 0.1z}$. В итоге, предполагая, что

основной вклад для постоянной затухания δ_0 больших пузырьков вносят радиационные потери [7, 18], т.е. $\delta_0(r, z) \approx \delta_0(r, 0) \sqrt{1 + 0.1z}$, можно написать следующую формулу для относительной массы газа в пузырьках:

$$M(r, z) \approx (8 / 3) R_0(r, 0) m_V(r, z) \delta_0^2(r, 0) \rho'(r, 0) (1 + az)^{5/2}, \quad (16)$$

Зная скорость движения судна и характеристику направленности излучателя, можно получить оценку массы выходящего метана в ГФ за время T в виде

$$M_\Sigma \approx \int_0^T \int_0^{h(t)} M(z, t) dz S(t) U(t) \frac{dt}{h(t)}, \quad (17)$$

или

$$M_\Sigma \approx \frac{8}{3} \int_0^T \int_0^{h(t)} m_V(t, z) (1 + az)^{5/2} dz S(t) U(t) R_0 \delta_0^2 \rho' \frac{dt}{h(t)}, \quad (18)$$

где через R_0 , δ_0 и ρ' обозначены соответствующие величины при $z = 0$. В итоге в течение $T = 850$ с вдоль трассы получаем оценку массы выделившегося в пузырьках метана, которая составляет $M_\Sigma = 0.3$ кг. Таким образом, интегральная производительность всех ГФ составляет 0.35 г/с. Учитывая, что количество одиночных ГФ, встречающихся вдоль трассы за указанное время, более десятка, можно оценить производительность одиночного ГФ около 0.02–0.05 л/с. Примерно подобную производительность ГФ ранее регистрировали различные авторы в Северном [34], Средиземном [35], Охотском [14], Черном [36] морях.

Следует учесть, что акустическое зондирование проводилось на расстоянии около 1 км с поперечным захватом зондирования около 20 м. Используя эти данные, можно оценить относительный выход метана в районе зарегистрированных ГФ, приходящийся на 1 км², примерно величиной 2100 м³ / сут* км², или 1.5 т / сут* км².

4. Заключение и выводы

Представлены теоретические модели и показаны типичные физические механизмы взаимодействия звука с мелкомасштабными неоднородностями морской среды: с пузырьковыми облаками и с планктонными сообществами в море.

Проведены многочисленные экспериментальные работы по изучению рассеяния звука на мелкомасштабных неоднородностях в Японском и Охотском морях. Разработан эффективный акустический метод на основе рассеяния звука, позволяющий на различных частотах проводить изучение структуры звуко-

рассеивающих слоев, включая пузырьки, планктон, подводные газовые факелы. Полученные зависимости, связывающие коэффициент рассеяния звука m_v и распределение биомассы в морской среде, представляют интерес для использования их в оперативном акустическом мониторинге биоресурсов непосредственно на ходу судна.

Проведены оценки объема выходящих газов в пузырьках, составляющих ГФ в заливе Петра Великого

Японского моря и сравнение с выделением газов в виде пузырьков других ГФ. Показано, что применение рассеяния звука позволяет дать оценку газосодержания и концентрации планктона в верхнем слое моря.

Программы и гранты: Работа выполнена в рамках госзадания по теме FWMM-2024-0015 (гос. рег. № 124022100075-6).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45, № 4. С. 437–444.
2. Lavery A.C., Wiebe P.H., Stanton T.K. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations // J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 122. P. 3304–3326.
3. Jech J.M., Horne J.K., Chu D. Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research // J. Acoust. Soc. Am. 2015. Vol. 138, No. 6. P. 3742–3764.
4. 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.
5. Селивановский Д.А., Диденкулов И.Н., Муякшин С.И., Стунжас П.А. Акустические свойства планктона // Динамика сплошной среды. 2001. Вып. 117. С. 35–42.
6. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // J. Phys. Ocean. 2000. Vol. 30. P. 2163–2171.
7. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 414 с. <https://www.poi.dvo.ru/node/470>.
8. Farmer D., Vagle S. Wave Induced Bubble Clouds in the Upper Ocean // Journ. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. C12054.
9. Vagle S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. C12054. DOI:10.1029/2009JC005990
10. Deane G.B., Preisig J.C., Lavery A.C. The suspension of large bubbles near the seasurface by turbulence and their role in absorbing forward-scattered sound // IEEE Journ.of Oceanic Eng. 2013. Vol. 38, No. 4. P. 632–641. DOI: 10.1109/JOE.2013.2257573
11. Kienle J., Roederer J.G., Shaw G.E. Volcanic event in Soviet Arctic // EOS. 1983. Vol. 64, No. 20. P. 377.
12. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Варанов В.В., Кузнецов А.П., Кузин В.С., Кузьмин М.И., Авдейко Г.П., Стунжас П.А., Лукашин В.Н., Бараш М.С., Вальяшко Г.М., Демина Л.Л. Подводный газовый источник к западу от о-ва Парамушир // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 795–800.
13. Hovland M., Judd A.G., Burke P.A. The global flux of methane from shallow submarine sediments // Chemosphere. 1993. Vol. 26. P. 559–578.
14. Cranston R.E., Ginsburg G.D., Soloviev V.A. Gas venting and hydrate deposits in the Okhotsk Sea // Bulletin of Geological Society of Denmark. 1994. Vol. 41, No 1. P. 80–85.
15. Leifer I., Judd A. G. Oceanic methane layers: the hydrocarbon seep bubble deposition hypothesis // Terra Nova. 2002. Vol. 14. P. 417–424.
16. Обжиров А.И. История открытия газогидратов в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 72–80.
17. Дмитриевский А.Н., Баланик И.Е. Газогидраты морей и океанов. М.: ИРЦ Газпром, 2009. 416 с.
18. Саломатин А.С., Юсупов В.И., Верещагина О.Ф., Черных Д.В. Акустическая оценка концентрации метана в водной толще в областях его пузырьковой разгрузки // Акуст. журн. 2014. Т. 60, № 6. С. 636–644.
19. Буланов В.А., Корсков И.В., Соседко Е.В. О применении нелинейного рассеяния звука для оценки структуры и размерного состава газовых факелов в море // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4. С. 45–52. DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.006
20. Акуличев В.А., Буланов В.А., Стороженко А.В. Акустические исследования зоопланктона в Японском море и восточной Арктике // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 2. С. 219–222.
21. Андреева И.Б., Тарасов Л.Л. Акустические свойства морских организмов, образующих звукорассеивающие слои океана // Акуст. журн. 2003. Т. 49, № 3. С. 318–324.
22. Акуличев В.А., Буланов В.А., Стороженко А.В. Оценка распределения планктона в океане методом акустического зондирования // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438, № 2. С. 267–270.
23. Буланов В.А., Соседко Е.В. Особенности нестационарного и нелинейного рассеяния звука на пузырьках и возможности их спектроскопии // Акуст. журн. 2022. Т. 68, № 4. С. 1–12. DOI: 10.31857/S0320791922040025
24. Буланов В.А., Валитов М.Г., Корсков И.В., Шакиров Р.Б. О глубоководных акустических неоднородностях в придонных слоях в Охотском и Японском море // Подводные исследования и робототехника. 2022. Т. 41, № 3. С. 67–78. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_06.
25. Валитов М.Г., Шакиров Р.Б., Ли Н.С. Геолого-геофизические и океанографические исследования в Японском море, Татарском проливе в 61-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Опарин» // Океанология. 2022. Т. 62, № 1. С. 165–167. DOI: 10.31857/S003015742201018X.
26. Валитов М.Г., Ли Н.С., Шакиров Р.Б., и др. Геолого-геофизические и океанографические исследования восточной части Охотского моря в 92-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» // Океанология. 2022. Т. 62, № 3. С. 502–504. DOI: 10.31857/S0030157422030169.
27. Буланов В.А., Корсков И.В., Соседко С.Н., Стороженко А.В. Система многочастотного акустического зондирования для исследования акустических характеристик верхнего слоя моря // Приборы и техника эксперимента. 2020. Т. 63, № 3. С. 131–136. DOI: 10.31857/S0032816220030167.
28. Chapman R., Bluy O., Adlington R., Robinson A. 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.
29. Peiper R.E. Euphausiid distribution and biomass determined acoustically at 102 kHz // Deep-Sea Res. 1979. Vol. 26. P. 687–702.

30. Kristansen A., Dalen J. Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton // J. Acoust. Soc. Am. 1986. Vol. 80, No. 2. P. 601–613.
31. Orłowski A. Hydroacoustic Characteristics of Scattering Layers in the Northeastern Atlantic Ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol. 88, No. 1. P. 298–309.
32. Gorska N., Chu D. Some aspects of sound extinction by zooplankton // J. Acoust. Soc. Am. 2001. Vol. 110, No. 5. P. 2315–2325.
33. Macaulay M.C. A generalized target strength model for euphausiids, with applications to other zooplankton // J. Acoust. Soc. Am. 1994. Vol. 95, No. 9. P. 2452–2467.
34. Hovland M., Judd A.G. Seabed pockmarks and seepages. Impact in geology, biology and the marine environment. London: Graham & Trotman, 1988. 293 p.
35. Dando P.R., Hagens J.A., Leahy Y., et al. Gas venting rates from submarine hydrothermal areas around the island of Milos, Hellenic volcanic arc // Continental Shelf Research. 1995. Vol. 15, No. 8. P. 913–929.
36. Dimitrov L. Contribution to atmospheric methane by natural seepages on the Bulgarian continental shelf // Continental Shelf Research. 2002. Vol. 22. P. 2429–2442.

Справка об авторах

БУЛАНОВ Владимир Алексеевич, д. физ.-мат. н., зав. лаб.
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН
Адрес: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: физическая акустика, гетерофазные жидкости, океан, микронеоднородности, пузырьки, акустическое зондирование
Тел.: 84232374913 (рабочий); +79241250613 (сот)
E-mail: bulanov@poi.dvo.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5504-9042>

КОРСКОВ Игорь Владимирович, к. физ.-мат. н., с.н.с.
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН
Адрес: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: физическая акустика, гетерогенности морской среды, научное оборудование
Тел.: 84232374913 (рабочий); +79147283073 (сот)
E-mail: i_korskov@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-6590-9598

СТОРОЖЕНКО Андрей Викторович, н.с.
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН
Адрес: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: физическая акустика, океан, рассеяние звука, микронеоднородности, планктон, пузырьки
Тел.: 84232374913 (рабочий); +79024896157 (сот)
E-mail: storozhenko_and@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-4633-0166

Для цитирования:

Буланов В.А., Корсков И.В., Стороженко А.В. РАССЕЙАНИЕ ЗВУКА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ В ЯПОНСКОМ И ОХОТСКОМ МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 3 (49). С. 83–96. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_49_03_08. EDN: XXORQO.



SOUND SCATTERING AND VARIABILITY OF THE UPPER LAYER STRUCTURE IN THE SEA OF JAPAN AND THE SEA OF OKHOTSK

V.A. Bulanov, I.V. Korskov, A.V. Storozhenko

The results of sound scattering studies in the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk in various years are presented. The relevance of the research is related to the need to create operational methods to assess the variability of the structure of the marine environment during the continuous movement of the vessel. This circumstance is especially important near the frontal zones and flow boundaries, when the characteristics of the medium change over a short distance and therefore no contact methods allow for a detailed spatial survey of the structure of the medium near such boundaries. An effective acoustic method based on sound scattering has been developed, which allows studying the structure of sound-scattering layers, including bubbles, plankton, underwater gas flares, at various frequencies. Sound scattering coefficients were measured during the course of the vessel and at individual stations at frequencies from 12 to 100 kHz. Estimates of plankton biomass along traces based on sound scattering have been carried out. Studies of sound scattering in underwater gas flares found at the shelf boundary in the Sea of Japan are presented. The presented theoretical models made it possible to estimate the concentration of gas in the bubbles forming gas flares, as well as to estimate the total amount of gas escaping from the discovered gas flares on the shelf of the Sea of Japan.

Keywords: sound scattering, seawater, bubbles, plankton, acoustic spectroscopy, underwater gas torch

References

1. Andreeva I.B. Zvukorasseivajushhie sloi – akusticheskie neodnorodnosti tolshhi vod okeana. *Akust. zhurn.* 1999. Vol. 45, No. 4. P. 437–444. (In Russ.).
2. Lavery A.C., Wiebe P.H., Stanton T.K., et al. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. Vol. 122. P. 3304–3326.
3. Jech J.M., Horne J.K., Chu D. Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research. *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. Vol. 138, No. 6. P. 3742–3764.
4. Sandler B.M., Selivanovskij D.A., Stunzhas P.A., Krupatkina D.K. Gazovye puzyr'ki i morskoy fitoplankton. Ul'trazvukovye reverberacionnye izmerenija. *Okeanologija.* 1992. Vol. 32, No. 1. P. 92–100. (In Russ.).
5. Selivanovskij D.A., Didenkulov I.N., Mujakshin S.I., Stunzhas P.A. Akusticheskie svojstva planktona. *Dinamika sploshnoj sredy.* 2001. Vyp. 117. P. 35–42. (In Russ.).
6. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean. *J. Phys. Ocean.* 2000. Vol. 30. P. 2163–2171.
7. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Akusticheskie issledovanija melkomasshtabnyh neodnorodnostej v morskoy srede. *Vladivostok: TOI DVO RAN,* 2017. 414 p. <https://www.poi.dvo.ru/node/470>. (In Russ.).
8. Farmer D., Vagle S. Wave Induced Bubble Clouds in the Upper Ocean. *Journ. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. C12054.
9. Vagle, S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. 12054. doi:10.1029/2009JC005990
10. Deane G.B., Preisig J.C., Lavery A.C. The suspension of large bubbles near the seasurface by turbulence and their role in absorbing forward-scattered sound. *IEEE Journ. of Oceanic Eng.* 2013. Vol. 38, No. 4. P. 632–641. DOI: 10.1109/JOE.2013.2257573
11. Kienle J., Roederer J.G., Shaw G.E. Volcanic event in Soviet Arctic. *EOS.* 1983. Vol. 64, No. 20. P. 377.
12. Zonenshajn L.P., Murdmaa I.O., Varanov V.V., Kuznecov A.P., Kuzin V.S., Kuz'min M.I., Avdejko G.P., Stunzhas P.A., Lukashin V.N., Barash M.S., Valjashko G.M., Demina L.L. Podvodnyj gazovyj istochnik k zapadu ot o-va Paramushir. *Okeanologija.* 1987. Vol. 27, No. 5. P. 795–800. (In Russ.).
13. Hovland M., Judd A.G., Burke P.A. The global flux of methane from shallow submarine sediments. *Chemosphere.* 1993. Vol. 26. P. 559–578.
14. Cranston R.E., Ginsburg G.D., Soloviev V.A., et al. Gas venting and hydrate deposits in the Okhotsk Sea. *Bulletin of Geological Society of Denmark.* 1994. Vol. 41. No. 1. P. 80–85.
15. Leifer I., Judd A. G. Oceanic methane layers: the hydrocarbon seep bubble deposition hypothesis. *Terra Nova.* 2002. Vol. 14. P. 417–424.
16. Obzhurov A.I. Istorija otkrytija gazogidratov v Ohotskom more. *Podvodnye issledovanija i robototehnika.* 2006. No. 2. P. 72–80. (In Russ.).
17. Dmitrievskij A.N., Balanjuk I.E. Gazogidraty morej i okeanov. M.: IRC Gazprom, 2009. 416 p. (In Russ.).
18. Salomatin A.S., Jusupov V.I., Vereshhagina O.F., Chernyh D.V. Akusticheskaja ocenka koncentracii metana v vodnoj tolshhe v oblastjah ego puzyr'kovoj razgruzki. *Akust. zhurn.* 2014. Vol. 60, No. 6. P. 636–644. (In Russ.).
19. Bulanov V.A., Korskov I.V., Sosledko E.V. O primenenii nelinejnogo rassejanija zvuka dlja ocenki struktury i razmernogo sostava gazovyh fakelov v more. *Podvodnye issledovanija i robototehnika.* 2020. No. 4. P. 45–52. DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.006. (In Russ.).
20. Akulichev V.A., Bulanov V.A., Storozhenko A.V. Akusticheskie issledovanija zooplanktona v Japonskom more i vostochnoj Arktike. *Doklady Akademii nauk.* 2016. Vol. 470, No. 2. P. 219–222. (In Russ.).

21. Andreeva I.B., Tarasov L.L. Akusticheskie svojstva morskikh organizmov, obrazujushchih zvukorasseivajushhie sloi okeana. *Akust. zhurn.* 2003. Vol. 49, No. 3. P. 318–324. (In Russ.).

22. Akulichev V.A., Bulanov V.A., Storozhenko A.V. Ocenka raspredelenija planktona v okeane metodom akusticheskogo zondirovaniya. *Doklady Akademii nauk.* 2011. Vol. 438, No. 2. P. 267–270. (In Russ.).

23. Bulanov V.A., Sosedko E.V. Osobennosti nestacionarnogo i nelinejnogo rassejanija zvuka na puzyr'kah i vozmozhnosti ih spektroskopii. *Akust. zhurn.* 2022. Vol. 68, No. 4. P. 1–12. DOI: 10.31857/S0320791922040025. (In Russ.).

24. Bulanov V.A., Valitov M.G., Korskov I.V., Shakirov R.B. O glubokovodnykh akusticheskikh neodnorodnostjakh v pridonnykh slojakh v Ohotskom i Japonskom more. *Podvodnye issledovanija i robototekhnika.* 2022. Vol. 41, No. P. S. 67–78. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_06. (In Russ.).

25. VValitov M.G., Shakirov R.B., Li N.S. Geologo-geofizicheskie i okeanograficheskie issledovanija v Japonskom more, Tatarskom prolive v 61-m rejse nauchno-issledovatel'skogo sudna «Akademik Oparin». *Okeanologija.* 2022. Vol. 62, No. 1. P. 165–167. DOI: 10.31857/S003015742201018X. (In Russ.).

26. Valitov M.G., Li N.S., Shakirov R.B., i dr. Geologo-geofizicheskie i okeanograficheskie issledovanija vostochnoj chasti Ohotskogo morja v 92-m rejse nauchno-issledovatel'skogo sudna «Akademik M.A. Lavrent'ev». *Okeanologija.* 2022. Vol. 62, No. 3. P. 502–504. DOI: 10.31857/S0030157422030169. (In Russ.).

27. Bulanov V.A., Korskov I.V., Sosedko S.N., Storozhenko A.V. Sistema mnogochastotnogo akusticheskogo zondirovaniya dlja issledovanija akusticheskikh harakteristik verhnego sloja morja. *Pribory i tehnika jeksperimenta.* 2020. Vol. 63, No. 3. P. 131–136. DOI: 10.31857/S0032816220030167. (In Russ.).

28. Chapman R., Bluy O., Adlington R., Robinson A. 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.

29. Peiper R.E. Euphausiid distribution and biomass determined acoustically at 102 kHz. *Deep-Sea Res.* 1979. Vol. 26. P. 687–702.

30. Kristansen A., Dalen J. Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. Vol. 80, No. 2. P. 601–613.

31. Orłowski A. Hydroacoustic Characteristics of Scattering Layers in the Northeastern Atlantic Ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. Vol. 88, No. 1. P. 298–309.

32. Gorska N., Chu D. Some aspects of sound extinction by zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. Vol. 110, No. 5. P. 2315–2325.

33. Macaulay M.C. A generalized target strength model for euphausiids, with applications to other zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. Vol. 95, No. 9. P. 2452–2467.

34. Hovland M., Judd A.G. Seabed pockmarks and seepages. Impact in geology, biology and the marine environment. London: Graham & Trotman, 1988. 293 p.

35. Dando P.R., Huggins J.A., Leahy Y. Gas venting rates from submarine hydrothermal areas around the island of Milos, Hellenic volcanic arc // *Continental Shelf Research.* 1995. Vol. 15, No. 8. P. 913–929.

36. Dimitrov L. Contribution to atmospheric methane by natural seepages on the Bulgarian continental shelf. *Continental Shelf Research.* 2002. Vol. 22. P. 2429–2442.

Information about the authors

BULANOV Vladimir Alekseevich, Doctor of Sci. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041

Research interests: physical acoustics, heterophase liquids, ocean, micro-inhomogeneities, bubbles, acoustic sensing

Phone: 84232374913 (official); +79241250613 (cell phone)

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-5504-9042

KORSKOV Igor Vladimirovich, PhD (Physics and Mathematics), senior scientific employee Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041

Research interests: physical acoustics, heterogeneity of the sea environment, equipment for researches

Phone: 84232374913 (official); +79147283073 (cell phone)

E-mail: i_korskov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-6590-9598

STOROZHENKO Andrey Viktorovich, researcher Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041

Research interests: physical acoustics, ocean, sound scattering, micro-inhomogeneities, plankton, bubbles

Phone: 84232374913 (official); +79024896157 (cell phone)

E-mail: storozhenko_and@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-4633-0166

