

О РАССЕЯНИИ ЗВУКА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ И НА ШЕЛЬФЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

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

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток*

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko_and@poi.dvo.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований рассеяния звука в верхнем слое морской воды в северо-западной части Тихого океана. Измерения коэффициентов рассеяния звука проводились на различных частотах от 12 до 100 кГц на шельфе и в открытом океане. Исследования представляли интерес в связи с возможностью оперативно в процессе движения судна проводить мониторинг изменчивости структуры морской среды. Проведение долговременных исследований рассеяния звука на планктоне и других микронеоднородностях морской среды в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря с применением акустических донных систем позволило определить вариации рассеяния звука, связанного с наличием пузырьков и суточных вариаций планктона в толще моря. Показаны возможности и проведены оценки биомассы вдоль длинных трасс в различных морях северо-западной части Тихого океана на основе рассеяния звука.

Ключевые слова: рассеяние звука, верхний слой океана, планктон, пузырьки, внутренние волны.

ON SOUND SCATTERING IN THE UPPER LAYER AND ON THE SHELF OF THE NORTH-WEST PACIFIC OCEAN

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

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: bulanov@poi.dvo.ru; i_korskov@poi.dvo.ru; storozhenko_and@poi.dvo.ru

Abstract

The results of studies of sound scattering in the upper layer of sea water in the North-Western Pacific Ocean are presented. Sound scattering coefficients

were measured at various frequencies from 12 to 100 kHz on the shelf and in the open ocean. The research was of interest because it was possible to monitor the variability of the marine environment structure quickly during the ship's movement. Long-term studies of sound scattering on plankton and other micro-heterogeneities of the marine environment in Vityaz Bay, Peter the Great Bay, Sea of Japan, using acoustic bottom systems, allowed us to determine variations in sound scattering associated with the presence of bubbles and diurnal variations of plankton in the sea column. The possibilities of biomass along long trails in various seas of the North-West Pacific Ocean based on sound scattering are shown and estimated.

Keywords: sound scattering, upper ocean layer, plankton, bubbles, internal waves.

Введение

Наиболее изменчивым слоем водной толщи океана является верхний слой. Для этого слоя характерно сосредоточение биоресурсов и наличие интенсивных динамических процессов [1, 5, 10, 12, 17]. Взаимодействие океан – атмосфера оказывает сильное влияние на динамику приповерхностных вод и их структуру. Приповерхностный слой характеризуется развитой турбулентностью, аномально высокими концентрациями газовых пузырьков, которые приводят к повышенному рассеянию и поглощению звука, а также к усилению масс и газообмена между океаном и атмосферой [5, 9, 14, 16, 24]. Исследования рассеяния звука позволяют изучать мелкомасштабную структуру морской среды и ее изменчивость. В приповерхностном слое моря резко выражены флуктуации гидрофизических характеристик, связанных с пузырьковыми структурами, образующимися при обрушении ветровых волн [2, 4, 13–16]. Эти пузырьковые облака, как правило, модулируются по концентрации поверхностными волнами, что в итоге приводит к специфическим эффектам при рассеянии и распространении звука [18, 23, 24].

Большую роль в рассеянии звука играют планктонные сообщества, и в первую очередь с позиции иерархии сечения рассеяния звука одиночным объектом выступает особь зоопланктона [1, 11, 17, 20, 25]. Фитопланктон рассеивает звук существенно слабее, однако наличие его в больших количествах порой создает конкуренцию зоопланктону в рассеянии звука на высоких частотах [1, 9, 17, 20].

Аномальное рассеяние звука на планктоне и других микронеоднородностях, локализованных вблизи термоклина, позволяет получать информацию о различных гидрофизических процессах в море – внутренних волнах, течениях и крупномасштабной турбулентности [1, 4, 15, 23, 24].

При развитии волнения моря всегда наблюдается повышенное рассеяние звука, обусловленное газовыми пузырьками, вовлеченными в толщу морской воды динамикой движений в поверхностных волнах. Одновременно в верхнем слое моря наблюдается повышенное рассеяние звука, связанное с наличием планктона. Зачастую в приповерхностном слое одновременно находятся облака пузырьков и мощные скопления планктона, тогда возникает проблема идентификации акустических сигналов, рассеянных отдельными пузырьками и особями планктона [4, 13, 22, 23].

Изучение рассеяния звука в верхнем слое океана имеет важное значение для развития методов оперативной океанологии, 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, которые имеют связь с положением и характеристиками термоклина. В сущности, можно использовать особенности динамики звукорассеивающих слоев для оценки характера процессов в толще океана.

Ниже представлены результаты исследований по рассеянию звука на различных частотах для изучения детальной структуры и динамики верхнего слоя моря с высоким пространственным и временным разрешением.

Рассеяние звука на планктоне

Акустический метод зондирования океана, основанный на измерениях обратного рассеяния звука, является примером дистанционного метода, позволяющего оперативно изучать структуру водной среды океана. Имея информацию об амплитудах падающей на объем V волны P_i и рассеянной в обратном направлении P_{bs} , можно определить коэффициент объемного рассеяния m_V [1, 4, 5, 8]:

$$m_V = \frac{2}{\pi\theta^2 c\tau} \left(\frac{P_{bs}}{P_i} \right)^2, \quad (1)$$

где V_{imp} – импульсный рассеивающий объем среды, $V_{imp} = \pi r^2 \theta^2 c\tau / 2$, θ – ширина характеристики направленности излучателя, c – скорость звука, τ – длительность импульса звука. С другой стороны, коэффициент объемного рассеяния звука m_V в приближении однократного рассеяния (борновском приближении) определяется выражением, учитывающим функцию распределения по размерам $g(R)$ и сечение рассеяния $\sigma(R, \omega)$ одиночным включением в виде

$$m_V = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \sigma(R, \omega) g(R) dR. \quad (2)$$

Имея функцию распределения по размерам $g(R)$ и плотность включений в различных точках пространства $\rho'(r)$, можно определить концентрацию биомассы по формуле [3,4]

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

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. появились модели [1, 11, 20, 25], которые позволяют оценить коэффициент рассеяния звука как планктоном малого размера, так и большим зоопланктоном и рыбами.

Количественно связь размеров R и концентрации зоопланктона при $R < 1$ см была впервые получена Цейтлиным [10] для организмов, обитающих в тропических биологически бедных и биологически богатых районах океана, которые выражаются степенной функцией распределения по размерам $g(R) \sim R^{-n}$, где $n \approx 3.7$. В случае $R > 1$ см, т.е. при больших размерах зоопланктона, $g(R)$ имеет вид функции с максимумом при некотором размере \bar{R} , который может быть ярко выраженным или несколько размазан в интервале размеров Δ в зависимости от вида зоопланктона. Здесь наиболее распространенной является Гауссовская модель. Общее выражение, позволяющее получать данные по распределению биомассы в рамках степенного P и Гауссовского G распределений, имеет вид [3, 4]:

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

где коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ равен

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

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

Результаты исследований рассеяния звука в Тихом океане

Целенаправленные эксперименты по изучению рассеяния звука в верхнем слое океана в ТОИ ДВО РАН проводились на НИС «Акад. А. Виноградов». Схема экспедиций представлена на рис. 1, а. На рис. 1, б представлена картина рассеяния звука на частоте 12 кГц вдоль трассы в северной части Южно-Китайского моря. Одновременно с пространственной изменчивостью рассеяния звука наблюдались суточные вариации звукорассеивающих слоев, которые в темное время суток поднимаются к поверхности.

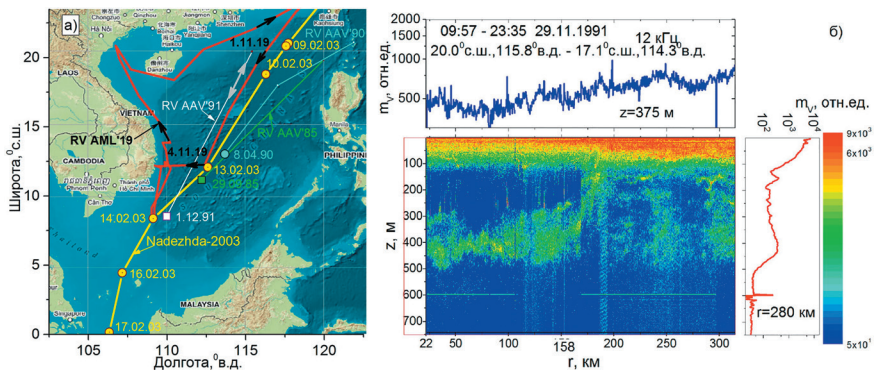


Рис. 1. а) схема маршрутов экспедиций, в которых проходили исследования по рассеянию звука в Южно-Китайском море; б) рассеяние звука на частоте 12 кГц на звукорассеивающих слоях в Южно-Китайском море

В 2003 и 2004 гг. в Южно-Китайском море были проведены исследования рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль маршрута следования парусного судна «Надежда», совершающего кругосветную экспедицию. Осенью 2019 г. в 88 рейсе НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» были проведены исследования рассеяния звука на частоте 25 кГц. На рис. 2, а представлена картина рассеяния звука в верхнем слое, полученная на судне «Надежда» в 2003 г. в глубоководной части Южно-Китайского моря. На рис. 2, б представлено распределение коэффициента рассеяния звука m_V на частоте 25 кГц вдоль протяженной трассы 396 км в центральной части Южно-Китайского моря. На правом графике рис. 2, б – $m_V(z)$ при $r = 113$ км, вверху – $m_V(r)$ на различных глубинах: 1 – $z = 80$ м, 2 – $\langle m_V(r) \rangle$ по глубине от 0 до 200 м, 3 – $z = 920$ м.

Из рис. 2 видны суточные вариации коэффициента рассеяния звука, которые связаны с суточными перемещениями по глубине планктона и рыбы. На частоте 25 кГц удается получить данные по рассеянию звука на биологических объектах до значительных глубин более 1 км непосредственно на ходу судна.

На рис. 3 представлено распределение коэффициента рассеяния звука на частоте 100 кГц вдоль трассы длиной около 900 км в водах Охотского моря [3, 4]. Видны суточные вариации m_V , достигающие 20 дБ, наложенные на тренд m_V , достигающий 5–6 дБ. Основные суточные вариации m_V для Охотского и Южно-Китайского моря в среднем

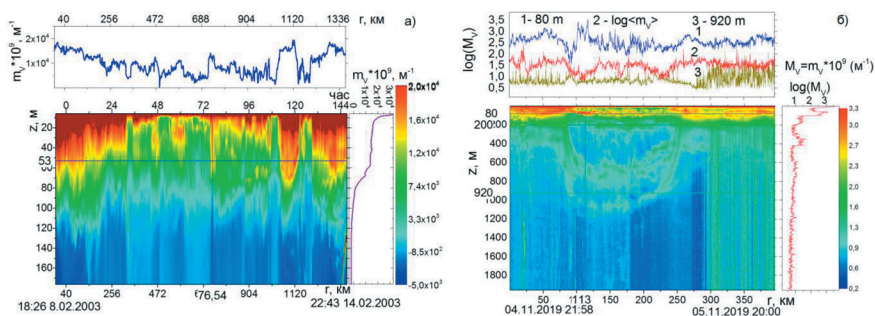


Рис. 2. Коэффициент рассеяния звука m_V на различных частотах в центральной части Южно-Китайского моря: а) на частоте 100 кГц вдоль трассы в феврале 2003 г.; б) на частоте 25 кГц в ноябре 2019 г.

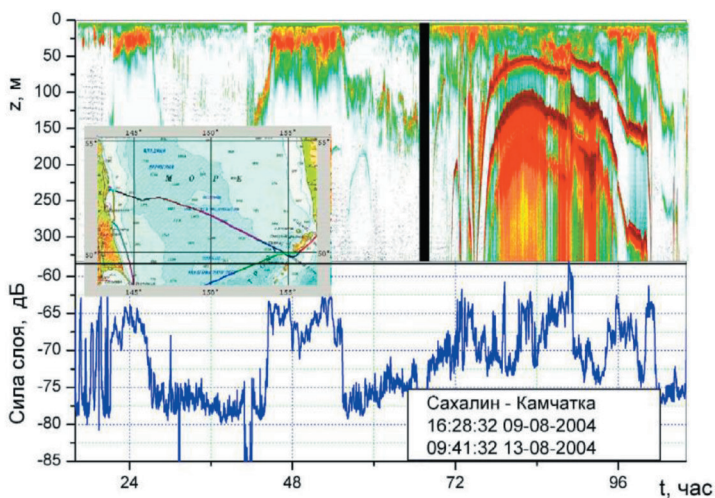


Рис. 3. Распределение рассеяния звука вдоль трасс в Охотском море

схожи на частоте 100 кГц, но отличаются по сравнению с частотой 25 кГц, для которой суточная изменчивость рассеяния звука достигает больших глубин 1000–1200 м.

Важным вопросом для развития методов оперативной океанологии является вопрос о пространственном разрешении и выборе частот излучаемого звука в методе акустического зондирования для оперативного изучения океанологических фронтов. В экспедиции 88 рейса НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» в 2019 г. были записаны сигналы рассеяния звука на частоте 19.5 кГц при пересечении в Японском море фронтального раздела, отделяющего субарктические водные массы от субтропических. На рис. 4, а видно, что вблизи точки с координатами 39.20N 130.77E звукорассеивающий слой с глубины около 50 м резко заглубляется на глубину 150–200 метров. Далее везде вдоль маршрута ниже параллели 39.20N в теплых субтропических водных массах звукорассеивающий слой в глубоком море располагался на глубинах около 200 метров и ниже. Интересно сравнить картину рассеяния звука при переходе через фронтальный раздел, полученную в зимний период на другой частоте 100 кГц в период кругосветной экспедиции на паруснике «Надежда» в 2003 г. Из рис. 4, а и рис. 4, б

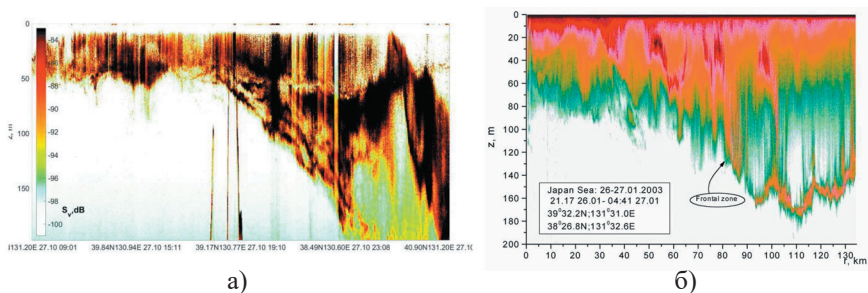


Рис. 4. Рассеяние звука на различных частотах при переходе через фронт в Японском море: а) на частоте 19,5 кГц в осенний период; б) на частоте 100 кГц в зимний период

видно, что в результате на различных частотах и в различные сезоны удастся отследить положение фронтального раздела, отделяющего субарктические водные массы от субтропических. Несмотря на различие в частотах и время года, наблюдается очень яркая контрастность в структуре рассеяния звука, что позволяет непосредственно на ходу судна с большим пространственным разрешением отследить детали фронтального раздела.

Акустическая оценка концентрации планктона

Полученные данные для коэффициента рассеяния звука с помощью формулы (4), (5) могут быть использованы для оценки концентрации планктона. Коэффициент $D^{(P,G)}(f)$ имеет сложный вид, например, для частоты $f \sim 100$ кГц можно получить $D^{(P)} \sim 2 \cdot 10^2$ г·м/л [4]. Приведенная оценка в дальнейшем использована для оценки распределения биомассы в верхнем слое моря.

На рис. 5 представлены сравнительные акустические оценки концентрации планктона, полученные в 2003–2004 гг. в кругосветной экспедиции на судне «Надежда», а также в ноябре 2019 г. в 88 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Видно, что в открытом океане средняя концентрация планктона примерно одинакова в различных районах, включая суточные вариации концентрации планктона в открытых частях океана. Концентрация планктона возрастает вблизи островов в тропической части океана и в окраинных морях, что

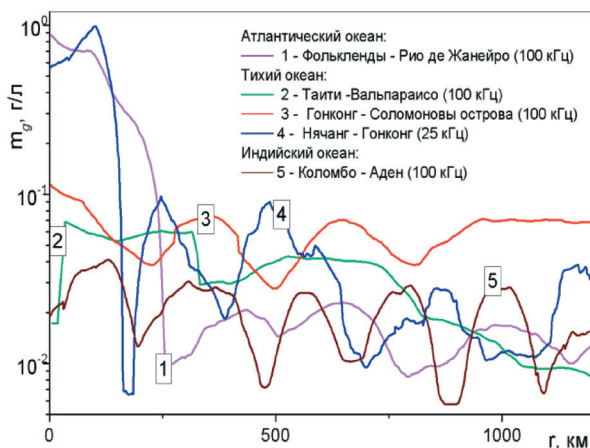


Рис. 5. Концентрация планктона по данным о рассеянии звука для различных районов Мирового океана (по данным кругосветной экспедиции на ПУС «Надежда» в 2003–2004 гг., кривые 1, 2, 3, 5 – фрагменты одной и той же протяженностью для трасс с переменной длиной) и данных НИС «Акад. М.А. Лаврентьев» в 2019 г. (кривые 4)

согласуется с результатами различных авторов [1, 10, 11, 17]. Полученные зависимости, связывающие коэффициент рассеяния звука m_V и распределение биомассы в морской среде, представляют интерес для использования их для оперативного акустического мониторинга биоресурсов на ходу судна.

Рассеяние звука на шельфе Японского моря

При развитии волнения всегда наблюдается повышенное рассеяние звука, обусловленное газовыми пузырьками, вовлеченными в толщу морской воды динамикой движений в поверхностных волнах [4, 5]. Одновременно в верхнем слое моря наблюдается повышенное рассеяние звука, связанное с наличием планктона [2, 3]. Ниже представлены результаты изучения детальной структуры и динамики верхнего слоя моря с высоким пространственным и временным разрешением. Проведение долговременных исследований рассеяния звука на планктоне и других микронеоднородностях морской среды в бухте

Витязь залива Петра Великого Японского моря с применением акустических донных систем позволило определить вариации рассеяния звука, связанного с наличием пузырьков и суточных вариаций планктона в толще моря [3,4]. Удалось также провести детальные морские исследования при различных погодных условиях. Были подготовлены акустические донные системы с инвертированными высоконаправленными эхолотами для исследований в верхнем слое моря, которые установлены в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря. Это позволило получить новые данные о суточных вариациях коэффициента рассеяния звука и связанных с ними вариациях распределения биомассы в форме зоо- и фитопланктона в толще моря.

В бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря были установлены две акустические донные системы на небольшом разнесении около 20 метров на глубинах около 10–12 метров с инвертированными высоконаправленными эхолотами на частотах в интервалах 54–64 кГц, 110–126 кГц, 138 кГц [7]. Одна донная система состоит из двух акустических преобразователей с рабочей частотой 60 кГц, направленных под углом 25 градусов относительно друг друга. Другая донная система состоит из трехэлементного широкополосного направленного излучателя и приемного гидрофона, установленных на дно с направлением излучения вертикально вверх. На рис. 6 показана функциональная схема донных систем. Схема позволяет проводить исследования рассеяния звука путем коммутации акустических излучателей и приемников в различных сочетаниях. Режимы излучения

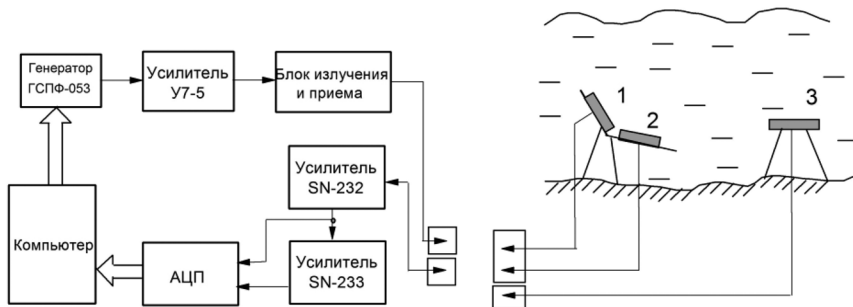


Рис. 6. Функциональная схема донных систем: 1, 2 – акустические излучатели двухэлементной акустической системы, 3 – акустический трехэлементный излучатель

программируются цифровым генератором сигналов специальной формы (ГСПФ-053), усиливаются и передаются на выбранный излучатель. Тракт приема позволяет вести регистрацию сигналов рассеяния как в узком диапазоне частот селективным усилителем SN-233, так и в широком диапазоне усилителем SN-232.

Исследования рассеяния звука на звукорассеивающих структурах в различные сезоны позволили идентифицировать объекты рассеяния (планктон, пузырьковые облака, рассеяние, связанное с динамикой внутренних волн) и получить новые данные о сезонных и суточных вариациях коэффициента рассеяния звука в толще моря [3, 4].

В качестве примера на рис. 7 представлено акустическое изображение приповерхностных пузырьковых облаков по мере их развития с усилением ветра и одновременное рассеяние звука на зоопланктоне, визуализирующее внутренние волны большой амплитуды, полученное с применением донных акустических систем. На рис. 8 показаны типичные летние коэффициенты объемного рассеяния, полученные на частоте 138 кГц в августе в течение нескольких дней. Серым цветом на оси времени везде на рисунках отмечен ночной период. Из ре-

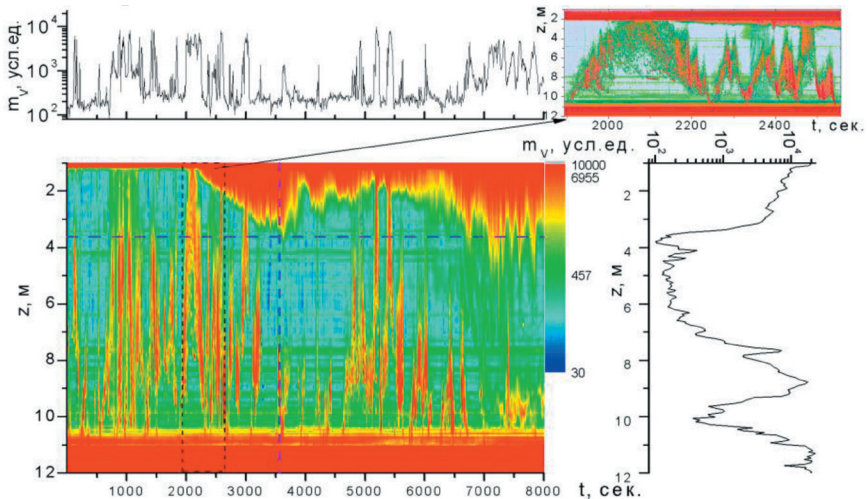


Рис. 7. Характер рассеяния звука на пузырьковых облаках по мере их развития и одновременное рассеяние звука на зоопланктоне, визуализирующие внутренние волны большой амплитуды

зультатов, представленных на рис. 8, видно, что основное рассеяние звука в море связано со сгущениями планктона, которые испытывают суточные изменения своей структуры. Одновременно можно видеть, что в приповерхностном слое моря всегда наблюдается повышенная концентрация воздушных пузырьков, которая особенно сильно увеличивается при сильном ветре и волнении.

По частотной зависимости коэффициента рассеяния звука $m_V(\omega)$ может быть найдена функция распределения пузырьков по размерам $g(R)$ в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта [2, 4, 22]:

$$g(R(\omega)) = \frac{2}{\pi R^3(\omega) Q_\omega} m_V(\omega), \quad R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega, \quad (6)$$

где Q_ω – добротность пузырьков на циклической частоте $\omega = 2\pi f$.

Полученные данные позволили получить функции распределения пузырьков по размерам, которые на рис. 9 показаны для пузырьков,

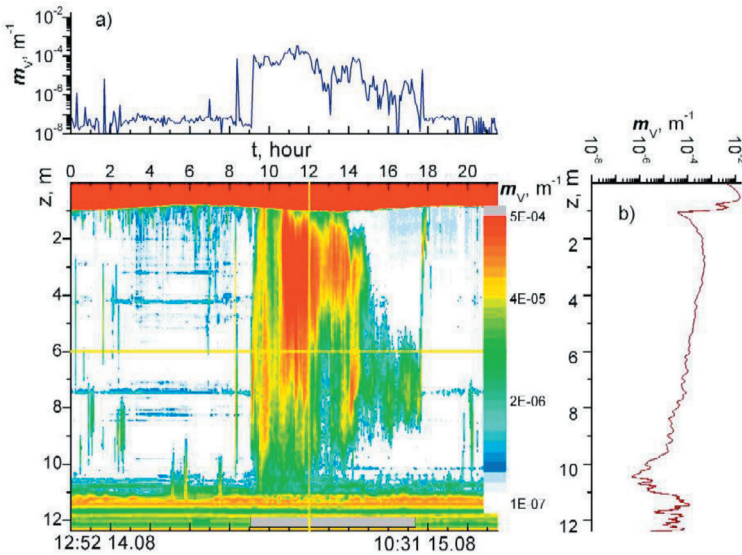


Рис. 8. Изменения коэффициента объемного рассеяния звука с частотой 138 кГц на зоопланктоне с 12:52 14 августа по 10:31 15 августа

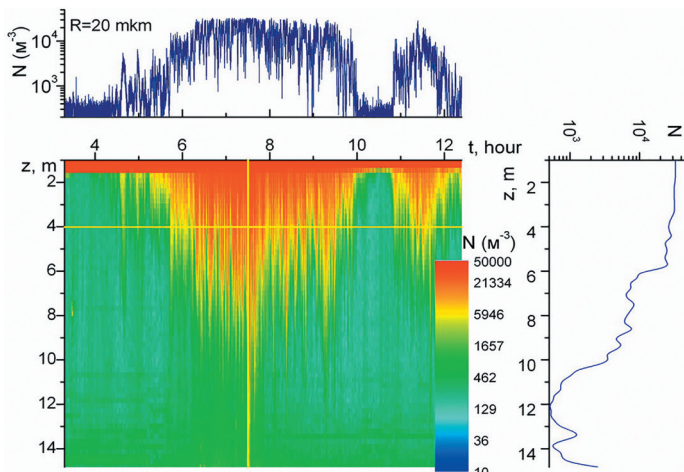


Рис. 9. Изменчивость концентрации пузырьков в пузырьковых облаках – функции $N(t, z)$, сверху и справа – горизонтальный ($z = 3$ м) и вертикальный профили $N(t, z)$

резонансных на частоте 138 кГц на различных глубинах в различные временные периоды развития шторма. Кривые сверху и справа от рисунка соответствуют положению курсора на центральном рисунке. Из рис. 9 видно, что с усилением ветра происходит существенное вовлечение пузырьков в толщу моря. Полученные экспериментальные результаты позволили аппроксимировать распределение пузырьков сравнительно простой функцией $g(R)$ вида:

$$g(R) = A_g R^{-n} \exp \left[-n \left(\frac{R_p}{R} - 1 \right) - \frac{R}{R_m} \right]. \quad (7)$$

В формуле (7) показатель степени n и критические размеры R_p (максимум $g(R)$), R_m (спад $g(R)$ при больших R) являются естественными параметрами, которые следуют из теории Гаррета – Фармера в инерционном интервале между размерами R_p, R_m [19]. При этом оказывается, что величина $n \sim 3.3$, хотя при измерениях $g(R)$ на большом фактическом материале в умеренных состояниях моря оказывается $n \sim 3.5-3.8$. [3,6].

На рис. 10 показана типичная временная и спектральная характеристика динамики планктона в течение половины суток, выполняющего

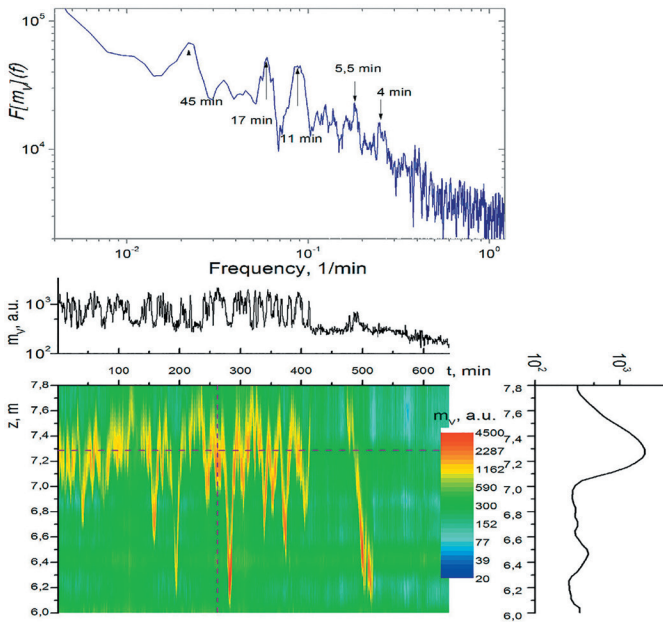


Рис. 10. Динамика планктона, выполняющего роль трассера внутренних волн с наиболее ярко выраженными периодами 45 мин, 17 мин, 11 мин.

роль трассера внутренних волн с наиболее ярко выраженными периодами. Из рис. 10 можно выявить наиболее характерные периоды в 11, 17 и 45 минут, которые могут быть связаны с характерными периодами собственных колебаний бухты Витязь, которые модулируют коэффициент рассеяния звука на планктоне в толще моря.

Заключение

Обсуждены результаты исследований рассеяния звука на различных частотах от 12 до 100 кГц на шельфе и в открытом океане в верхнем слое морской воды в северо-западной части Тихого океана. Представлены типичные вариации коэффициента объемного рассеяния звука вдоль протяженных трасс, располагающихся в различных морях северо-западной части Тихого океана. Применение акустических донных систем в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря позволило провести долговременные исследования рассеяния звука,

связанного с наличием пузырьков, а также суточных вариаций планктона в толще моря. Применение донных акустических систем позволяет эффективно разделить вклад в рассеяние звука, обусловленный наличием планктона и воздушных пузырьков, и позволяет дать независимую оценку газосодержания и концентрации планктона в верхнем слое моря. Показано, что данные по рассеянию звука позволяют оценить концентрацию пузырьков, а также важную характеристику биопродуктивности вод – массовую концентрацию включений и их суммарное количество в интервале размеров. Показаны возможности и проведены оценки биомассы вдоль длинных трасс в различных морях северо-западной части Тихого океана на основе рассеяния звука.

Благодарность. Работа выполнена по госзаданию № 0271-2019-0009 и частично поддержана грантами РФФИ № 17-02-00561а и программы «Дальний Восток» № 18-И-004.

Литература

1. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437–444.
2. Акуличев В.А., Буланов В.А. О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // Докл. АН. 2012. Т. 446. № 2. С. 212–215.
3. Акуличев В.А., Буланов В.А., Стороженко А.В. Акустические исследования зоопланктона в Японском море и восточной Арктике // Докл. АН. 2016. Т. 470. № 2. С. 219–222. DOI:10.7868/S0869565216260145
4. 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>.
5. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 264 с.
6. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронесодородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука. 2001. 281 с.
7. 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. № 3. С. 131–136. DOI: 10.31857/S0032816220030167.
8. Исмару И. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир. 1981. Т. 1, 2.
9. 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.

10. Цейтлин В.Б. Размерное распределение пелагических организмов в тропических районах океана // *Океанология*. 1981. Т. 21. № 1. С. 125–131.
11. Andreeva I.B., Belousov A.V., Multiple sound scattering by densely packed shoals of marine animals // *ICES Journal of Marine Science*. 1996. Vol. 53. P. 323–327.
12. Andreas E.L., Monahan E.C. The role of whitecap bubbles in air-sea heat and moisture exchange // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. Vol. 30. P. 433–441.
13. Akulichiev V.A., Bulanov V.A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. No 5. Pt. 2. P. 3438–3449.
14. Babanin V. Breaking of ocean surface waves. // *Acta Physica Slovaca*. 2009. Vol. 59. No 4. P. 305–535.
15. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. No 1. P. 241–245.
16. Deane G.B., Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. Vol. 102. P. 2671–2689.
17. Chapman R., Bluy R., Adlington A., et al. Deep Scattering Layer Spectra in the Atlantic and Pacific Oceans and Adjacent Seas // *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. No. 6. P. 1722–1734.
18. Farmer D.M., Vagle S. Wave Induced Bubble Clouds in the Upper Ocean // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. 16 pp. DOI: 10.1029/2009jc005990.
19. 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. No 9. P. 2163–2171.
20. Jech J.M., Horne J.K., Chu D., et al. Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. Vol. 138. No 6. P. 3742–3764.
21. Lei Han, YeLi Yuan. Bubble size distribution in surface wave breaking entraining process // *Science in China. Series D: Earth Sciences*. 2007. Vol. 50. No 11. P. 1754–1760.
22. Medwin H. Acoustical determination of bubble size spectra // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. Vol. 62. P. 1041–1044.
23. Thorpe S.A. Measurements with an automatically recording inverted echo sounder; ARIES and the bubble clouds // *J. Phys. Oceanography*. 1986. Vol. 16. P. 1462–1478.
24. 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. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. DOI: 10.1029/2009JC005990.
25. 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.

References

1. Andreeva I.B. Zvukorasseyvajushhie sloi – akusticheskie neodnorodnosti tolshhi vod okeana // *Akust. zhurn.* 1999. Vol. 45. No 4. P. 437–444.

2. Akulichev V.A., Bulanov V.A. O spektre puzyr'kov gaza i vozmozhnostyah akusticheskoy spektroskopii v pripoverhnostnom sloe okeana // *Doklady Akademii nauk*. 2012. Vol. 446. No 2. P. 212–215.
3. Akulichev V.A., Bulanov V.A., Storozhenko A.V. Akusticheskie issledovaniya zoolplanktona v Japonskom more i vostochnoj Arktike // *Doklady Akademii nauk*. 2016. Vol. 470. No 2. P. 219–222. DOI:10.7868/S0869565216260145.
4. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Akusticheskie issledovaniya melkomasshtabnyh neodnorodnostej v morskoy srede. Vladivostok: TOI DVO RAN. 2017. 414 p. <https://www.poi.dvo.ru/node/470>.
5. Brehovskih L.M., Lysanov Ju.P. *Teoreticheskie osnovy akustiki okeana*. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 264 p.
6. Bulanov V.A. *Vvedenie v akusticheskuyu spektroskopiju mikroneodnorodnyh zhidkostej*. Vladivostok: Dal'nauka. 2001. 281 p.
7. Bulanov V.A., Korskov I.V., Sosedko S.N., Storozhenko A.V.. Sistema mnogochasotnogo akusticheskogo zondirovaniya dlja issledovaniya akusticheskikh harakteristik verhnego sloja morja // *Pribory i tehnika jeksperimenta*. 2020. No 3. P. 131–136. DOI: 10.31857/S0032816220030167.
8. Isimaru I. *Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno-neodnorodnyh sredah*. M.: Mir. 1981. Vol. 1, 2.
9. Sandler B.M., Selivanovskij D.A., Stunzhas P.A., Krupatkina D.K. Gazovye puzyr'ki i morskoy fitoplankton. Ul'trazvukovye reverberacionnye izmereniya // *Okeanologija*. 1992. Vol. 32. No 1. P. 92–100.
10. Cejtlin V.B. Razmernoe raspredelenie pelagicheskikh organizmov v tropicheskikh rajonah okeana // *Okeanologija*. 1981. Vol. 21. No 1. P. 125–131
11. Andreeva I.B., Belousov A.V., Multiple sound scattering by densely packed shoals of marine animals // *ICES Journal of Marine Science*. 1996. Vol. 53. P. 323–327.
12. Andreas E.L., Monahan E.C. The role of whitecap bubbles in air–sea heat and moisture exchange // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. Vol. 30. P. 433–441.
13. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. No 5. Pt. 2. P. 3438–3449.
14. Babanin V. Breaking of ocean surface waves // *Acta Physica Slovaca*. 2009. Vol. 59. No 4. P. 305–335.
15. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. No 1. P. 241–245.
16. Deane G.B., Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1997. Vol. 102. P. 2671–2689.
17. Chapman R., Bluy R., Adlington A., et al. 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.
18. Farmer D.M., Vagle S. Wave Induced Bubble Clouds in the Upper Ocean // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. 16 pp. DOI: 10.1029/2009jc005990.

19. 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. No 9. P. 2163–2171.
20. Jech J.M., Horne J.K., Chu D., et al. Comparisons among ten models of acoustic back-scattering used in aquatic ecosystem research // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. Vol. 138. No 6. P. 3742–3764.
21. Lei Han, YeLi Yuan. Bubble size distribution in surface wave breaking entraining process // *Science in China. Series D: Earth Sciences.* 2007. Vol. 50. No 11. P. 1754–1760.
22. Medwin H. Acoustical determination of bubble size spectra // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. Vol. 62. P. 1041–1044.
23. Thorpe S.A. Measurements with an automatically recording inverted echo sounder; ARIES and the bubble clouds // *J. Phys. Oceanography.* 1986. Vol. 16. P. 1462–1478.
24. 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 weekly soluble gases nitrogen and oxygen // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. DOI: 10.1029/2009JC005990.
25. 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.