

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 534.222.2+551.463.2

**СИСТЕМА МНОГОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРЯ**

© 2020 г. В. А. Буланов^{а,*}, И. В. Корсков^а, С. Н. Соседко^а, А. В. Стороженко^а

^а Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

*e-mail: bulanov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 28.12.2019 г.

После доработки 28.12.2019 г.

Принята к публикации 12.01.2020 г.

Описаны способ и аппаратный комплекс акустического зондирования для исследования акустических характеристик верхнего слоя моря с применением широкополосных остронаправленных инвертированных излучателей, устанавливаемых на дне. В основу способа положен принцип регистрации обратного рассеяния и отражения от водной поверхности акустических импульсов различной частоты, позволяющий одновременно измерять рассеяние и поглощение звука морской водой. Многочастотное зондирование позволяет реализовать акустическую спектроскопию пузырьков в приповерхностных слоях, проводить оценку содержания газа и получать данные о рассеивающих и поглощающих свойствах верхнего слоя морской воды при различных состояниях моря вплоть до штормовых. Приведены некоторые из результатов, полученных при многосуточном зондировании верхнего морского слоя на шельфе Японского моря.

DOI: 10.31857/S0032816220030167

ВВЕДЕНИЕ

Акустическое зондирование на основе метода регистрации обратного рассеяния звука позволяет изучать мелкомасштабную структуру морской среды. Наиболее изменчивым слоем водной толщи океана является верхний слой, и для этого слоя характерно сосредоточение биоресурсов и наличие интенсивных динамических процессов [1–3]. Флуктуации гидрофизических параметров среды за счет волновой турбулентности и других возмущений приводят к усилению рассеяния звука на высоких частотах [2–4]. Применение метода нестационарного широкополосного рассеяния [4] остронаправленных пучков ультразвука с использованием параметрических акустических излучателей [4, 5] позволяет получать новые экспериментальные данные о структуре пузырьковых облаков, образующихся при обрушении ветровых волн и их вовлечении в толщу моря.

Измерения концентрации пузырьков и их распределения по размерам $g(R)$ в море проводились различными методами, и результаты этих исследований представлены в большом количестве работ [6–10]. Тем не менее, остаются неясными многие вопросы распределения пузырьков по глубине [7, 8], закономерности их эволюции во времени после прохождения различных возмуще-

ний [8, 9], а также связь с акустическими свойствами верхнего слоя моря [10, 11]. Основная проблема при реализации исследований по акустическому зондированию заключается в необходимости проводить длительные измерения с высоким пространственным и временным разрешением [3, 7–11]. К недостаткам традиционных гидрофизических методов изучения динамичного верхнего слоя моря следует отнести излишнюю инертность, что не позволяет в полной мере изучать тонкую структуру и детальную динамику в верхнем слое [2, 3].

Целью работы является разработка метода и аппаратного комплекса, позволяющего доступным способом создать технологию акустического мониторинга верхнего слоя моря с применением широкополосных остронаправленных инвертированных излучателей, устанавливаемых на дне моря. Комплекс позволяет проводить измерения различных акустических и гидрофизических параметров с высоким пространственным и временным разрешением. Идея применения инвертированных излучателей для изучения структуры приповерхностного слоя не нова. Для примера можно сослаться на работы Торпа и Фармера с сотрудниками [2, 3, 7–9]. Новизна нашей работы заключается, прежде всего, в использовании акустических сигналов в широкой полосе ча-

стот за счет применения остронаправленных параметрических излучателей и излучателей с максимально возможным набором резонансных частот, позволяющих по отдельным точкам перекрывать широкий диапазон частот. К достоинствам разработанной компактной системы относятся также возможность одновременно проводить измерения не только звукорассеивающих характеристик морской воды, но и измерять коэффициент поглощения звука и распределение пузырьков в приповерхностных слоях моря, проводить оценку содержания газа в воде и получать данные о спектре поверхностных волн при различных состояниях моря вплоть до штормовых. Ниже приведены для примера некоторые результаты, полученные при многосуточном зондировании верхнего морского слоя на шельфе Японского моря.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Основа способа базируется на измерениях рассеяния звука и одновременных измерениях параметров отражающихся от свободной поверхности периодических акустических импульсов. Имея информацию об амплитуде падающей на объем V волны P_i и амплитуде рассеянной в обратном направлении волны P_{bs} , можно в борновском приближении определить коэффициент объемного рассеяния m_V [2–4]:

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

где $V_{imp} = \pi r^2 \theta^2 c\tau/2$ – импульсный рассеивающий объем среды, θ – ширина характеристики направленности излучателя, c – скорость звука, τ – длительность импульса звука. Когда поглощение звука на расстоянии r невелико, амплитуду $P_i(r)$ можно записать в виде $P_i(r) = Ae^{-\alpha r}/r \approx A/r$, где α – коэффициент поглощения звука, A , Па · м – калибровочное значение амплитуды излучаемого звука, измеряемого в паскалях и приводимого, как правило, к расстоянию в 1 м. Значение P_{bs} измеряется непосредственно в эксперименте. Поэтому, работая с многократными импульсами и воспользовавшись выражением (1), можно зарегистрировать изменение во времени коэффициента рассеяния звука во всей толще жидкости с высоким пространственным разрешением, которое определяется шириной характеристики направленности излучателя θ и длиной акустического импульса $l_{imp} = c\tau/2$, и с высоким временным разрешением, определяемым длительностью интервала времени между импульсами излучаемого звука. В условиях спокойного моря, без волнения и приповерхностных пузырьков, величину A мож-

но найти по известной амплитуде P_{i0} отраженного от поверхности импульса $A = P_{i0}2h$, где h – глубина моря от поверхности до дна. При этом следует положить, что $\alpha h \ll 1$ и $V \approx -1$, так что $P_i(r) = P_{i0} \exp(-\alpha r)(2h/r) \approx P_{i0}(2h/r)$. Подставляя данное выражение $P_i(r)$ в формулу (1), получим

$$m_V(r) = \frac{1}{2\pi c\tau\theta^2} \left(\frac{K_{i0}}{K_{bs}} \right)^2 \left(\frac{u_{bs}(r)}{u_{i0}} \right)^2 \left(\frac{r}{h} \right)^2 \exp \left(\int_0^r \alpha(\xi) d\xi \right). \quad (2)$$

Здесь учтено, что величина регистрируемого сигнала связана с величиной давления в приходящем сигнале соотношением $u = \mu KP$, где μ , В/Па – чувствительность антенны на приеме, K – коэффициент усиления тракта приема. Дифференцируя (2) по r , получаем уравнение, связывающее коэффициент поглощения звука $\alpha(r)$ и коэффициент рассеяния $m_V(r)$:

$$\alpha(r) = \frac{d}{dr} \ln \left\{ m_V(r) 2\pi c\tau\theta^2 \left(\frac{u_{bs}(r)}{u_{i0}} \right)^{-2} \left(\frac{r}{h} \right)^{-2} \left(\frac{K_{i0}}{K_{bs}} \right)^{-2} \right\} = \frac{d}{dr} \ln \left[\frac{m_V(r)}{r^2 u_{bs}(r)^2} \right]. \quad (3)$$

Функцию распределения пузырьков по размерам $g(R)$ можно найти 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 $R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0/\rho/\omega}$ [3, 4, 6]:

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta_\omega}{\pi R^3(\omega)} m_V(\omega), \quad (4)$$

где δ_ω – коэффициент резонансного затухания на частоте ω , а в формуле Миннерта P_0 – гидростатическое давление, $\gamma \approx 1.4$ – постоянная адиабаты газа внутри пузырька, ρ – плотность жидкости. Часто вместо величины $g(R)$ с размерностью $[\text{см}^{-4}]$ пользуются величиной $N(R)$ с размерностью $[\text{м}^{-3} \text{мкм}^{-1}]$, которая связана с $g(R)$ соотношением [4, 6] $N(R)$, $\text{м}^{-3} \text{мкм}^{-1} = 10^2 g(R)$ $[\text{см}^{-4}]$. Мы будем использовать оба способа описания спектра пузырьков в морской воде.

Коэффициент поглощения звука в пузырьковых облаках вблизи поверхности моря можно определить не только по формуле (3), но также рассчитать на основе данных, полученных для функции распределения пузырьков по размерам $g(R)$ по формуле [11]:

$$\alpha \approx \frac{\omega}{c} \text{Im} \left[1 + \frac{4\pi\rho c^2}{3\gamma P_0} \int_0^\infty \frac{g(R)dR}{q(R, R_\omega)} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

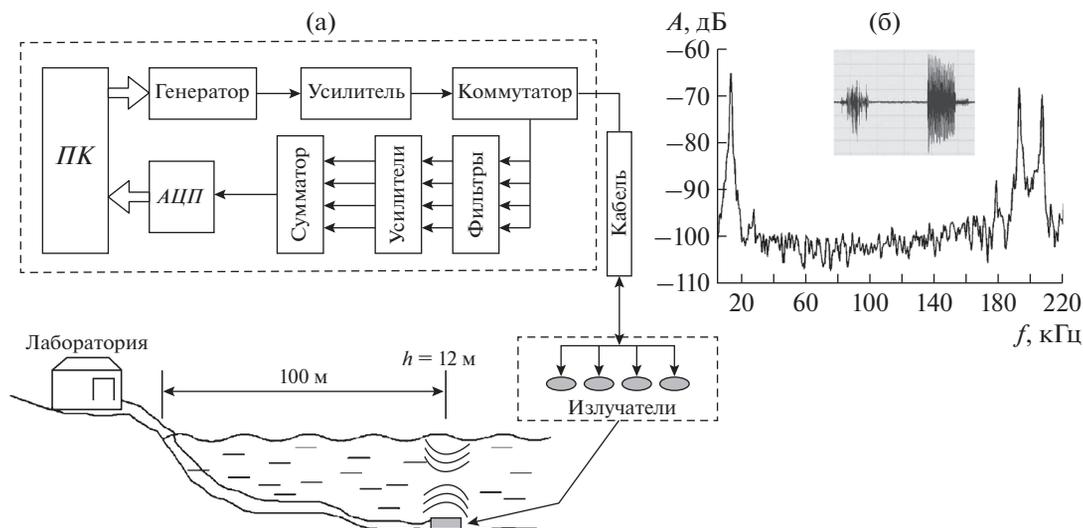


Рис. 1. Схема акустических измерений с донной станцией (а, ПК – персональный компьютер, АЦП – аналого-цифровой преобразователь) и спектр сигналов, отраженных от поверхности в параметрическом режиме (б, на врезке показана форма импульсных сигналов во времени).

где резонансный множитель $q(R, R_0) = 1 - (R/R_0)^2(1 + i\delta_\omega)$.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Система акустического зондирования, в которой был использован указанный выше способ, была создана в Тихоокеанском океанологическом институте (ТОИ) ДВО РАН. Измерения проводились в бухте Витязь Японского моря. В состав аппаратного комплекса входили тракт излучения звука с различными частотами, пьезокерамические преобразователи, тракт приема и система ввода и первичной обработки акустической информации (см. рис. 1).

Основу акустической части комплекса составляла донная система с гидроакустическими излучающими и приемными антеннами ($h = 10-14$ м). Система ввода и первичной обработки акустической информации включала в себя 14-разрядную плату ввода Ла2 USB (фирма "Руднев и Шилаев", Москва) с предельной частотой квантования 400 кГц, многоканальный цифровой регистратор МА-16 (фирма "Руднев и Шилаев") с предельной частотой записи 200 кГц, интерфейсную 12-разрядную плату ввода Е20-10 (фирма "Л-Кард") с предельной частотой квантования 10 МГц, а также персональные компьютеры и специальные программы обработки и визуализации акустических сигналов.

Для проведения долговременных исследований рассеяния звука на планктоне и других микронеоднородностях морской среды на дне в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря были установлены две акустические донные си-

стемы с инвертированными высоконаправленными эхолотами на частотах в интервалах 54–64, 110–126 кГц и 138, 216, 519 кГц. Расстояние между системами около 20 м. Основой первой системы является трехэлементный излучатель. Ширина основного лепестка характеристики направленности на частоте 138 кГц составляла 11.5° , на частоте 216 кГц – 7.2° , и на частоте 519 кГц – 3° . Кроме того, был установлен ненаправленный широкополосный гидрофон для регистрации, проведения калибровок и контроля излучения. Вторая донная система включала сдвоенные высоконаправленные излучатели (угол 25° между осями излучения). Все применяемые излучатели имеют резонансные максимумы, чувствительность на приеме в линейном режиме достигала 200–600 мкВ/Па. Для расширения частотного диапазона применялся также нелинейный режим параметрического излучения. Применялись два разных параметрических излучателя. Первый представлял собой излучающую и приемную антенну рыбопоискового эхолота "Пескарь" (завод "Прибой", г. Таганрог) с рабочими частотами накачки 250–300 кГц и разностной частотой 15–50 кГц. Второй параметрический излучатель был изготовлен на основе излучателя СА200-8В эхолота FURUNO (Япония) с рабочей частотой 200 кГц и максимально допустимой мощностью 2 кВт. Разностные частоты использовались в интервале 15–40 кГц, ширина диаграммы направленности на рабочей частоте составляла 5.6° и в параметрическом режиме оставалась примерно одинаковой на всех разностных частотах, что является важным свойством параметрических излучателей [4, 11, 12]. Амплитудно-частотная характеристика чув-

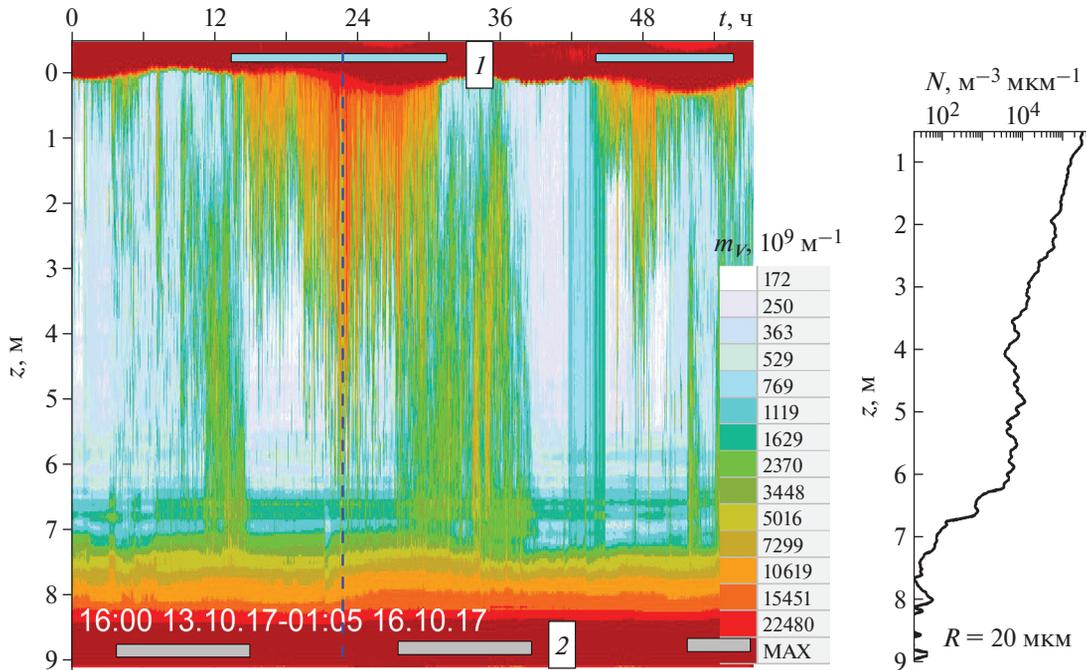


Рис. 2. Коэффициент рассеяния звука частотой 145 кГц на пузырьках (области 1) и на планктоне (области 2, ночной период) в течение нескольких суток. Справа показано распределение пузырьков $N(z)$ с резонансной частотой 145 кГц (радиус 20 мкм) в момент времени, отмеченный вертикальной штриховой линией.

ствительности излучателя, измеренная в полосе частот 20–400 кГц, составляла на резонансе около 1000 Па/В.

На рис. 16 показан спектр отраженных от поверхности сигналов в параметрическом режиме. При этом высокочастотная накачка проводилась на частотах 170 и 200 кГц, генерируемая в нелинейной морской среде разностная частота составляла 30 кГц. Там же на врезке рис. 16 показаны зависимости формы сигналов от времени.

Береговой комплекс аппаратуры позволял проводить многочастотное измерение сигналов рассеяния различными методами. Применялся метод одновременного излучения импульсов разных частот с последующей фильтрацией принимаемых сигналов по каналам [5] (рис. 1). В качестве цифрового генератора сигналов использовали программируемый генератор ГСПФ-053 (фирма “Руднев и Шилиев”). Широкополосные усилители мощности У7-5 использовались в качестве предварительных усилителей, оконечными усилителями были усилители, выполненные на базе высоковольтных транзисторов, они позволяли поднимать выходное напряжение до 400 В. Коммутатор сигналов был выполнен по схеме диодных коммутаторов эхолотов. В качестве селективных усилителей использовались нановольтметры SN-233 и SN-232 (фирма UNIPAN, Польша), третьоктавные фильтры RFT01018 (фирма Robotron, Германия), микрофонные усилители RFT00011 (Ro-

botron, Германия). Фильтры на отдельные частоты были изготовлены в лаборатории гидрофизики ТОИ ДВО РАН.

Упростить описанную схему стало возможно, применяя гетеродинное преобразование частот. Используя излучатели с частотами f_1 , f_2 и f_3 , равными 519, 216 и 138 кГц, можно применить следующую двухканальную схему. Частота гетеродина f_G выбирается так, чтобы сигналы с частотами 519, 216 кГц преобразовывались в один тракт усиления промежуточной частоты f_0 . Так как на выходе гетеродина присутствует как разностная, так и суммарная частоты, промежуточная частота f_0 выбирается так, чтобы соблюдалось равенство $f_1 - f_0 = f_2 + f_0 = f_G$, откуда $f_0 = (f_1 - f_2)/2$. Для частот 519 и 216 кГц промежуточная частота $f_0 = 151.5$ кГц, тогда частота гетеродина равна $f_G = 367.5$ кГц, как для суммарного, так и для разностного сигнала.

При использовании излучателей с другими рабочими частотами требуется только изменить частоту гетеродина без замены усилителей и фильтров. Другим важным моментом является понижение частоты сигнала при гетеродинировании – в нашем случае почти в 3.5 раза (с 519 до 150 кГц), что позволяет экономить соответствующее количество памяти. Для восстановления исходного сигнала можно сделать обратное преобразование частот. Сигналы с частотой 138 кГц записываются

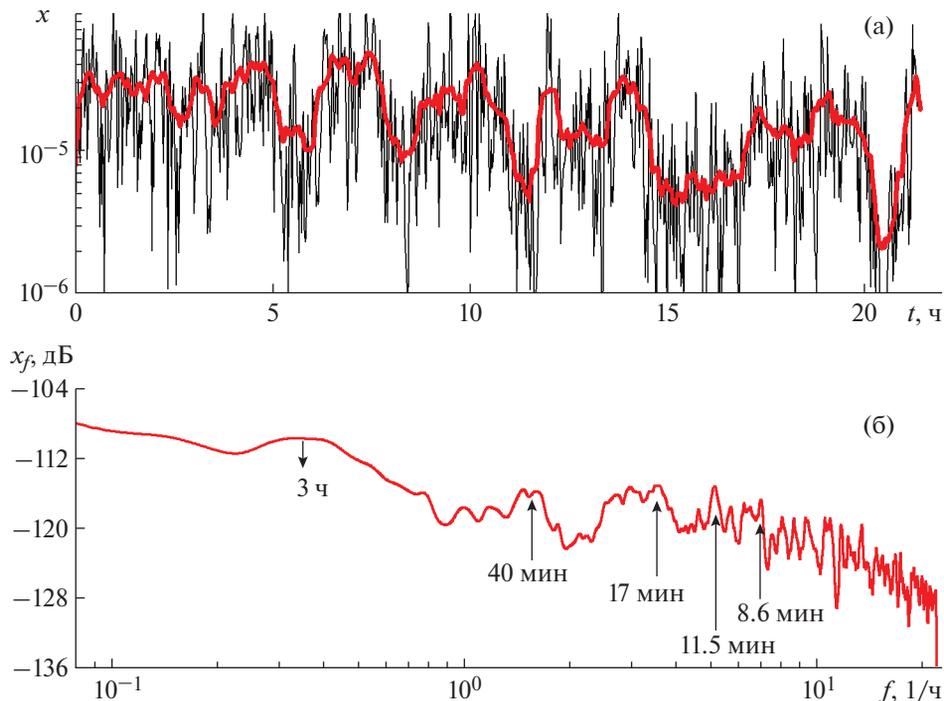


Рис. 3. Изменение во времени средней объемной концентрации газа $x(t)$, заключенного в пузырьках (а), и спектр функции концентрации газа (б) при наличии пузырьковых облаков, образующихся при обрушении ветровых волн.

без преобразования непосредственно на второй канал АЦП. Таким образом, применение гетеродина в приемном тракте многочастотной системы измерения рассеяния звука позволяет упростить схему за счет использования единого перестраиваемого тракта усиления сигналов промежуточной частоты и при этом уменьшить поток данных за счет снижения частоты сигналов, сэкономив ресурсы системы обработки и накопления данных.

Для проведения быстрой обработки данных и визуализации результатов измерений была разработана программа Scatter2 [13]. Программа Scatter2 является развитием программы Scatter, которая многократно использовалась при обработке данных акустического зондирования, полученных в различных районах океана [14].

ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРЯ

Использование описанного выше комплекса аппаратуры и программ обработки результатов измерений позволило получить данные по рассеянию звука в зависимости от глубины расположения рассеивающих объектов z и времени t на пузырьках (области 1) и планктоне (области 2) и оценить распределение коэффициента объемного рассеяния звука $m_V(z, t)$ на пузырьках и планктоне в течение нескольких суток (рис. 2). Области 2 на оси времени t соответствуют ночному перио-

ду, когда планктон проявляется наиболее ярко. Воспользовавшись формулой (4), можно определить распределение пузырьков $N_\omega(t, z)$, которое показано справа на рис. 2 для пузырьков, резонансная частота которых равна 145 кГц, что соответствует размерам 20 мкм.

Используя данные для рассеяния звука, можно изучить изменение во времени средней объемной концентрации газа $x = (4\pi/3) \int_{\{R\}} g(R) R^3 dR$, заключенного в пузырьках во всей толще слоя морской воды. Изменение во времени средней объемной концентрации газа, заключенного в пузырьках во всей толще слоя морской воды, представлено на рис. 3а. Спектр функции концентрации газа показан на рис. 3б. Видно, что концентрация газа достаточно велика, хорошо различимы характерные спектральные пики, отвечающие периодам усиления ветра над поверхностью моря и дающие начало пузырьковым облакам в воде и аномальному рассеянию звука, детали которых хорошо видны на рис. 2.

На основе экспериментальных данных по рассеянию звука, описывающих рассеяние звука на пузырьковых структурах вблизи поверхности моря, по формулам (3) и (5) можно рассчитать коэффициент поглощения звука. На рис. 4 представлены результаты расчета поглощения звука на частоте 145 кГц в приповерхностном слое пузырьков, из которых видно избыточное поглощение звука в пу-

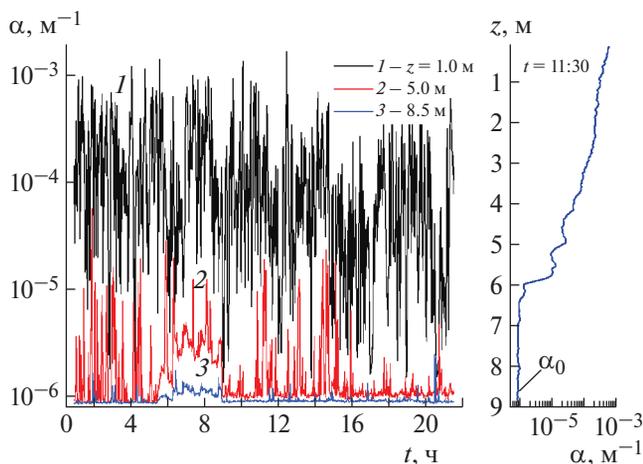


Рис. 4. Коэффициент поглощения звука на частоте 145 кГц в приповерхностном слое пузырьков.

зырьковом слое. Вблизи поверхности моря поглощение звука в 100 раз превышает поглощение звука в чистой воде α_0 . На больших глубинах поглощение звука стремится к известному значению поглощения звука в чистой воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан способ и продемонстрировано применение аппаратного комплекса для исследования акустических характеристик верхнего слоя моря с применением широкополосных остронаправленных инвертированных излучателей, которые устанавливаются на дно. Показано, что многочастотное зондирование позволяет проводить акустическую спектроскопию пузырьков в приповерхностных слоях моря, оценивать содержание газа и получать данные о рассеивающих и поглощающих свойствах верхнего слоя морской воды при различных состояниях моря вплоть до штормовых.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке по теме № АААА-А17-117030110040-8, по грантам РФФИ (№ 17-02-00561а и № 18-32-20146 мол_а_вед) и программе “Дальний восток” № 18-И-004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева И.Б. // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437.
2. Gemmrich J.R., Farmer D.M. // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. P. 1067. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2)
3. Thorpe S.A., Osborn T.R., Farmer D.M., Vagle S. // J. Phys. Oceanogr. 2003. V. 33. P. 2013. <https://doi.org/10.1017/S0022112082000123>
4. Akulichev V.A., Bulanov V.A. // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 130. № 5. Part 2. P. 3438. <https://doi.org/10.1121/1.3636371>
5. Буланов В.А., Корсков И.В. // ПТЭ. 2009. № 3. С. 120.
6. Medwin H. // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 62. P. 1041. <https://doi.org/10.1121/1.381617>
7. Vagle S., Farmer D. // J. Atmosph. and Ocean. Technology. 1992. V. 9. P. 630. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1992\)009<0630:TMOBSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1992)009<0630:TMOBSD>2.0.CO;2)
8. Vagle S., McNeil C., Steiner N. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. C12054. <https://doi.org/10.1029/2009JC005990>
9. Baschek B., Farmer D.M. // J. Atmosph. and Ocean. Technology. 2010. V. 27. № 1. P. 241. <https://doi.org/10.1175/2009JTECH0688.1>
10. Deane G.B., Preisig J.C., Lavery A.C. // IEEE J. Ocean. Eng. 2013. V. 38. № 4. P. 632. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2257573>
11. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. ISBN 978-5-9909943-8-6.
12. Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: Физматлит, 2010.
13. Соседко С.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019619697. Опубл. 23.07.2019.
14. Акуличев В.А., Буланов В.А., Стороженко А.В. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. № 2. С. 267.