

# О ГЛУБОКОВОДНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ В ПРИДОННЫХ СЛОЯХ В ОХОТСКОМ И ЯПОНСКОМ МОРЕ

**В.А. Буланов, М.Г. Валитов, И.В. Корсков, Р.Б. Шакиров**

Представлены данные по аномальному рассеянию звука на частоте 25 кГц на необычных глубоководных объектах (глубина 800–1000 м), располагающихся вблизи дна и имеющих размеры по высоте не более 40–60 м и по горизонтали до 500 м. Придонные акустические аномалии были обнаружены в Охотском море вблизи о-ва Атласова и в Татарском проливе. По своей структуре и коэффициенту рассеяния звука они отличаются от типичных глубоководных газовых факелов (ГФ). В качестве примера в работе показана структура известного Парамуширского ГФ, подробное акустическое зондирование которого также представлено для сравнения с выявленными придонными объектами. Высказано предположение, что обнаруженные подводные неоднородности представляют собой разновидность ГФ, но с меньшей производительностью источников выхода газа из донных осадков. Показано, что наличие в обнаруженных неоднородностях достаточно больших концентраций пузырьков может приводить к значительным изменениям эффективной скорости звука, к увеличению потерь при распространении звука и к изменению структуры низкочастотного акустического поля. Исследования проводились в ноябре 2020 г. в рейсе № 61 НИС «Академик Опарин» в Татарском проливе и в мае 2021 г. в рейсе № 92 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в северо-восточной части Охотского моря.

**Ключевые слова:** морская вода, пузырьки, газовые факелы, рассеяние, поглощение звука.

## 1. Введение

Метод рассеяния звука позволяет выполнять оценки структуры неоднородностей различного масштаба морской среды непосредственно на ходу судна с высоким пространственным разрешением. Возможность проводить мониторинг структуры морской среды по результатам исследования характеристик рассеяния звука особенно важна вблизи резких границ неоднородностей, когда характеристики среды изменяются на небольшом расстоянии и поэтому никакие контактные методы не позволяют осуществлять подробную пространственную съемку структуры среды вблизи таких границ.

В 1980-х гг. были открыты новые объекты в океане – подводные газовые факелы, образованные газовыми пузырьками, выходящими из дна моря [1–4]. 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, в районах выгрузки газа при таянии вечной мерзлоты в арктических морях и к ним проявляется все большее внимание [4–8]. Большую роль для обнаружения ГФ и изучения их структуры играют акустические методы зондирования на основе обратного рассеяния звука [9–12].

Природа происхождения ГФ и их структура весьма разнообразны. Это могут быть протяженные области выхода газов с размерами до сотен метров по горизонтали, которые проявляются в форме пелены пузырьков, поднимающихся со дна моря. Такие ГФ встречаются на относительно небольших глубинах и зачастую находятся вблизи нефтегазовых месторождений. Аналогичные структуры наблюдаются на шельфе в арктических морях [7, 11]. На больших глубинах встречаются одиночные подводные ГФ, имеющие сравнительно небольшие горизонтальные размеры, которые оцениваются десятками метров,

при этом они имеют значительные вертикальные размеры 100–300 м [4, 10]. Как правило, пузырьки, выходящие из дна моря, имеют размеры в интервале около 0.5–7 мм, при этом максимум распределения по размерам  $g(R)$  располагается при  $R$  около 4–5 мм [2, 3, 5, 7].

Обнаружение ГФ происходит обычно с помощью судовых эхолотов. Как правило, используются низкочастотные эхолоты с рабочими частотами от 12 до 30 кГц. Иногда для диагностики пузырьков факелов применяются высокочастотные эхолоты с частотами 135–200 кГц, но эффективность их резко снижается с глубиной вследствие поглощения звука, и применение таких акустических систем практически невозможно для диагностики глубоководных ГФ. Учитывая частотный диапазон применяемых низкочастотных эхолотов и характерные размеры пузырьков, поднимающихся со дна моря, можно утверждать, что диагностика ГФ осуществляется при нерезонансном линейном рассеянии звука [9–12]. Такое стандартное применение рассеяния звука позволяет, как правило, обнаружить наличие ГФ в море. К сожалению, применение стандартной акустической техники без сканирования частоты в широкой полосе частот не позволяет в полной мере осуществить акустическую спектроскопию и корректно оценить функцию распределения пузырьков  $g(R)$  в факеле. Более того, большая проблема в стандартных измерениях рассеяния звука обычными эхолотными средствами заключается в идентификации объектов рассеяния. Частично такая задача решается при наличии априорной информации о природе и свойствах подводных объектов, полученной другими средствами.

В последнее время возрос интерес к состоянию и динамике придонных слоев моря, которые являются важными связующими элементами, влияющими, в том числе, на динамику и структуру водной толщи океана. Изучение придонных слоев в шельфовых районах океана идет нарастающими темпами. Здесь оказалась важна более легкая техническая доступность таких районов. Изучение глубоководных придонных слоев океана сопряжено со значительными техническими трудностями, и получение новой информации в этом направлении имеет важное значение для океанологии.

В ноябре 2020 г. в рейсе № 61 НИС «Академик Опарин» в Татарском проливе и в мае 2021 г. в рейсе № 92 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в северо-восточной части Охотского моря были проведены исследования рассеяния звука на частоте 25 кГц с целью изучения глубоководных придонных неоднородностей. Важными задачами в указанных экспедициях были проведения оценок расположения

и строения подводных неоднородностей, включая ГФ, которые проводились на основе измерения коэффициентов рассеяния звука. В настоящей статье мы представляем полученные результаты, которые свидетельствуют о наличии аномального рассеяния звука на больших глубинах вблизи дна, обусловленные глубоководными подводными неоднородностями неизвестного происхождения. Предполагаем, что они представляют разновидность ГФ, но с меньшей производительностью источников выхода газа из донных осадков.

## 2. Экспериментальные методы и средства измерений и обработки данных

Для глубоководных измерений коэффициентов рассеяния звука использовались низкочастотные излучатели судовых эхолотов. Электронная часть эхолотов вышла из строя, но вмонтированные в днище судна излучатели были исправны. Основная задача заключалась в сопряжении новых акустических систем измерения со старыми излучателями. Фактически были использованы две различные системы измерения рассеяния звука:

Первая система – на основе эхолота FURUNO FCV-1150 (Япония), который мог использоваться для зондирования на частотах не ниже 25 кГц. Мощность излучения эхолота до 3 кВт, максимальные глубины до 3000 м. Проблема его использования заключалась в том, что рабочая частота пьезокерамического элемента излучателя, оставшегося от демонтированного эхолота ELAC, составляет 12 кГц. Была решена задача эффективного возбуждения излучателя на 2-й гармонике, которая фактически уже входила в рабочую полосу частот эхолота FURUNO FCV-1150.

В следующей системе для обеспечения работ на основной рабочей частоте излучателя 12 кГц был использован усилитель мощности QSC RMX 5050. Выходная мощность усилителя QSC RMX 5050 составляет до 5 кВт в мостовом включении каналов. На практике использовалось одноканальное подключение с мощностью 2.5 кВт.

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 на октаву) в диапазоне частот 3 Гц – 150 кГц. Система ввода и первичной обработки акустической информации включала в себя АЦП на базе 14-разрядной USB платы ввода E20-10 фирмы «Л-Кард» с предельной частотой кванто-

вания 10 МГц, 14-разрядной платы ввода Ла2-USB фирмы «Руднев и Шиляев» с предельной частотой квантования 400 кГц, 8-разрядный цифровой осциллограф PV 6501, способный осуществлять запись в режиме пикового детектора с предельной частотой квантования 8 кГц, персональные компьютеры и специальные программы обработки и визуализации акустических сигналов Scatter II, Aviewer, BinaryAcoustics v1.1.

На рис.1 представлена схема измерения рассеяния звука и глубины на частоте 25 кГц на основе эхолота FURUNO FCV-1150 (Япония). Представленная на рис.1 схема позволяла реализовать измерения рассеяния звука и глубины в рейсе при условии, что глубина моря была меньше 3000 м.

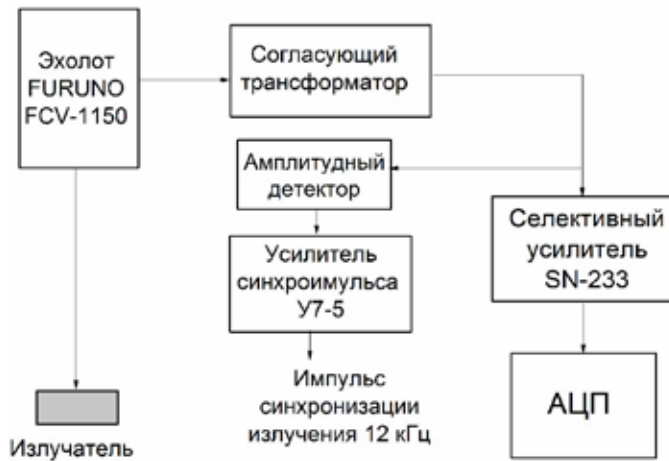


Рис. 1. Схема измерения рассеяния звука и глубины на частоте 25 кГц

Для измерения рассеяния звука и батиметрии при глубине моря больше 3000 м использовалась другая схема измерения, представленная на рис. 2. Здесь основной рабочей частотой была частота 12 кГц – резонансная частота судового излучателя ELAC. Для излучения мощных сигналов был использован усилитель мощности QSC RMX 5050. Съём аналоговой информации, фильтрация, оцифровка и предварительная обработка проводились аналогично схеме рис. 1. Важной особенностью этих разных методов изучения подводных структур является различие в угловом разрешении, которое для частоты 25 кГц было в 2 раза выше, что давало более чем в 2 раза выше пространственное разрешение по сравнению со схемой на рис.2. Поэтому там, где позволяла глубина моря, в рейсе использовалась схема измерений, представленная на рис. 1. Представленные на рис. 1 и рис. 2 схемы измерений позволяли реализовать измерения рассеяния звука и глубины в течение всего рейса.

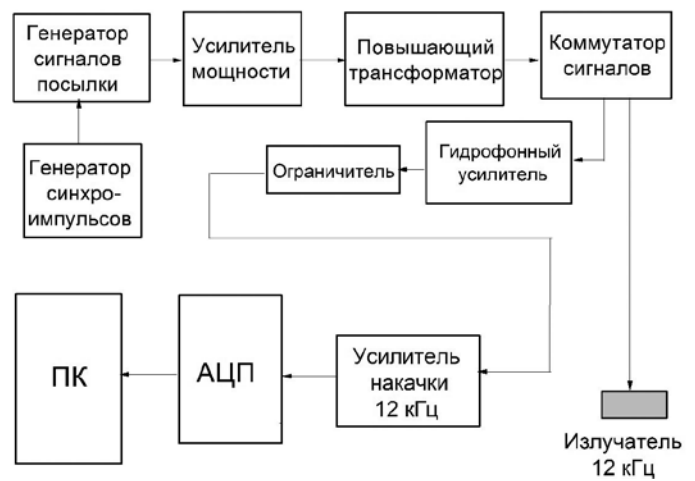


Рис. 2. Схема измерения рассеяния звука и глубины на частоте 12 кГц

### 3. Методы и теоретические основы

Кратко основа акустического метода регистрации и изучения структуры неоднородностей в водной толще заключается в применении импульсных акустических сигналов с целью их приема спустя определенное время после момента излучения, которое несет информацию о расстоянии, на котором находится рассеивающий объект. Совокупность принятых сигналов позволяет в дальнейшем решать обратную задачу восстановления структуры рассеивающего объекта [10–12]. Имея информацию об амплитудах падающей на объем  $V$  волны  $P_i$  и рассеянной в обратном направлении  $P_{bs}$ , можно в приближении однократного рассеяния (борновском приближении) определить коэффициент объемного рассеяния  $m_V$  в виде:

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

где  $\theta$  – ширина характеристики направленности излучателя,  $c$  – скорость звука,  $\tau$  – длительность импульса звука,  $P_i(z) = A \exp(-\alpha z) / z$ ,  $A$  – калибровочное значение амплитуды излучаемого звука, измеряемого в паскалях и приводимого, как правило, к расстоянию 1 метр,  $\alpha$  – коэффициент поглощения звука, когда поглощение звука на расстоянии  $z$  невелико,  $P_i(z) \approx A / z$ . Величина  $P_{bs}$  измеряется непосредственно в эксперименте. Используя многократное применение импульсов, можно с помощью формулы (1) зарегистрировать изменение во времени среднего коэффициента рассеяния звука и его флуктуаций во всей толще жидкости с высоким пространственным разрешением, определяемым шириной характеристики направленности излучателя  $\theta$ , длиной акустического импульса  $l_{imp} = c\tau / 2$  и высоким

временным разрешением, определяемым интервалом времени между импульсами излучаемого звука. Если отсутствует или изменилась калибровка для коэффициента  $A$  в формуле (1), ее значение можно восстановить на основе имеющейся информации по отражению звука от границ раздела сред. Основной шаг заключается в определении величины  $A$  в идеальных условиях спокойного моря без волнения и приповерхностных пузырьков. В этих условиях можно положить, что  $\alpha h \ll 1$  и  $V \approx -1$ . Если измерить давление  $P_h$  в первом отраженном импульсе, можно найти величину  $A$  в виде  $A = P_h 2h / V_h$ , где  $V_h$  – коэффициент отражения звука от дна. В итоге получаем выражение для коэффициента рассеяния звука в виде

$$m_V(z) = \frac{V_h^2}{2\pi c t \theta^2} \left( \frac{P_{bs}(z)}{P_h} \right)^2 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \exp\left(2 \int_0^z \alpha(x) dx\right). \quad (2)$$

Выбирая для калибровки участки относительно ровного каменистого дна, можно с определенной степенью допущения положить величину  $V_h \approx 0.3 - 0.5$  [13]. В формуле (2) важен последний множитель. В случае квазиоднородного распределения коэффициента поглощения звука до дна можно написать следующее приближенное уравнение для определения коэффициента рассеяния звука на глубоководных неоднородностях вблизи дна:

$$m_V(z) = \frac{A_V}{2\pi c t \theta^2} \left( \frac{P_{bs}(z)}{P_h} \right)^2 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \exp(2\alpha z), \quad (3)$$

где  $A_V = V_h^2 \approx 0.1 \div 0.3$ , при этом в качестве величины  $\alpha$  следует принимать среднее значение коэффициента поглощения звука на данной частоте в морской воде, которое в отсутствие неоднородностей можно вычислить на основе различных моделей и экспериментальных данных [13].

Следует обратить внимание на то, что в случае применения частот звука, когда наблюдается резонансное рассеяние на пузырьках в подводной неоднородности (например, в толще ГФ), можно определить функцию распределения пузырьков по размерам  $g(R)$ . 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 [12–15]:

$$R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 (1 + 0.1z) / \rho} / \omega, \quad (4)$$

где  $P_0$  – гидростатическое давление на поверхности моря,  $z$  – глубина в метрах,  $\rho$  – плотность воды,

$\gamma$  – постоянная адиабаты газа внутри пузырька, для двухатомного газа  $\gamma \approx 1.4$ . На поверхности моря типичные пузырьки, составляющие ГФ, известные из литературы, имеют достаточно большие размеры 0.5–7 мм, что 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 (4), можно видеть, что на большой глубине резонанс смещается в сторону увеличения частоты. В итоге, например, на глубине 800 м на частоте 25 кГц могут испытывать резонанс достаточно большие пузырьки с размерами 1.5 мм, которые уже входят в спектральный диапазон пузырьков ГФ. Таким образом, варьируя частоты в диапазоне от 30 до 4 кГц можно перекрыть весь спектральный диапазон пузырьков, составляющих ГФ и определить функцию распределения пузырьков по размерам в виде [14–17]:

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta}{\pi R^3(\omega)} m_V(\omega), \quad (5)$$

где  $\delta \approx 0.1$  – коэффициент резонансного затухания на больших глубинах. Учитывая формулу (3), можно написать более «практичное» выражение для определения функции распределения  $g(R(\omega))$  в виде [18]:

$$g(R(\omega)) = \frac{\delta}{\pi^2 R^3(\omega) c t \theta^2} \left( \frac{P_{bs}(z)}{P_h} \right)^2 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \exp(2\alpha z). \quad (6)$$

Вклад нерезонансного фона при рассеянии звука можно определить, используя выражение для амплитуды рассеяния в виде:

$$f(R) = R / \left[ (R_\omega / R)^2 - 1 - i\delta \right]. \quad (7)$$

Для оценок будем считать распределение пузырьков достаточно узким, например гауссовского типа, в виде  $g(R) = A_g \exp[-(R - \bar{R})^2 / \sigma_R^2]$ . Здесь  $\bar{R}$  – средний размер пузырьков,  $\sigma_R$  – средний разброс размеров. Используя нормировку  $N = \int_0^\infty g(R) dR$ , где  $N$  – количество пузырьков в единице объема, получаем  $A_g = 2N / \sqrt{\pi} \sigma_R$ . Используя общее определение для коэффициента рассеяния [13, 14]  $m_V = \int_0^\infty |f(R)|^2 g(R) dR$ , можно получить выражение для коэффициента нерезонансного рассеяния в виде

$$m_V = A_g \sqrt{\pi / 2} \sigma_R \bar{R}^2 = N \bar{R}^2. \quad (8)$$

В итоге по результатам нерезонансного рассеяния можно определить количество пузырьков в единице объема со средним размером  $\bar{R}$  в виде:

$$N = \frac{m_V}{\bar{R}^2} = \frac{A_V}{2\pi c\tau\theta^2 \bar{R}^2} \left( \frac{P_{bs}(z)}{P_h} \right)^2 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \exp(2\alpha z). \quad (9)$$

Вводя объемную концентрацию газа в пузырьках в виде  $x \approx (4\pi/3)N\bar{R}^3$ , можно выразить объемную концентрацию  $x$  через параметры рассеяния звука и средний размер пузырьков в ГФ в виде:

$$x = \frac{4\pi}{3} m_V \bar{R} = \frac{2A_V \bar{R}}{3c\tau\theta^2} \left( \frac{P_{bs}(z)}{P_h} \right)^2 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \exp(2\alpha z). \quad (10)$$

Аналогичные оценки для случая нерезонансного рассеяния содержатся в обзорных статьях [10, 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 [14–16]. Рассматриваемые в настоящей статье исследования, проведенные в экспедиции [19], не позволили в полной мере реализовать нестационарную спектроскопию пузырьков. В связи с этим ниже использовались распределения пузырьков в рамках моделей с подгоночными параметрами [20, 21], измеренными в эксперименте. Для этого была выбрана функция  $g(R)$  вида [20]:

$$g(R) = A_g R^{-n_1} \exp\left\{-n_2 \left[ (R_p / R) + (R / R_m) \right]\right\}. \quad (11)$$

При этом оказывается, что  $A_g \approx 10^{-8} \text{ см } n_1^{-4}$ ,  $n_1 \sim n_2 \approx 3.5 \div 4$  [15, 17, 20, 21] 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 можно выбрать следующие значения:  $R_p = 4$  мм,  $R_m = 7$  мм, которые в дальнейшем использовались для оценок.

#### 4. Экспериментальные результаты

##### 4.1. Особенности рассеяния звука на придонных неоднородностях

Исследования по рассеянию звука в Охотском море в 2021 г. проводились непрерывно вдоль всего маршрута НИС «Академик М.А. Лаврентьев» [19]. Первичные данные оцифровывались с частотами квантования, позволяющими воспроизвести записанные сигналы, с целью последующей обработки в цифровом виде по специально разработанным алгоритмам [18]. Типичная частота квантования составляла около 60 кГц, что при излучении на частоте 25 кГц позволяло осуществлять запись недетектиро-

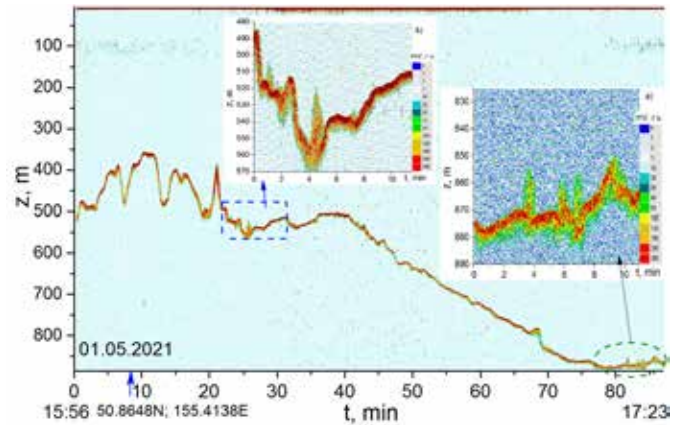


Рис. 3. Придонные аномалии рассеяния звука вблизи о-ва Атласова, зарегистрированные 01.05.2021 г.

ванного сигнала и в дальнейшем провести дополнительную фильтрацию сигналов.

На якорной стоянке в мелководной бухте вблизи побережья Приморья 18.04–19.04.21 и вблизи о-ва Парамушир 01.05–02.05.21 г. была проведена калибровка излучения на частоте 25 кГц. Изучение эффективности приема сигналов обратного рассеяния звука и различных режимов цифровой генерации сигналов

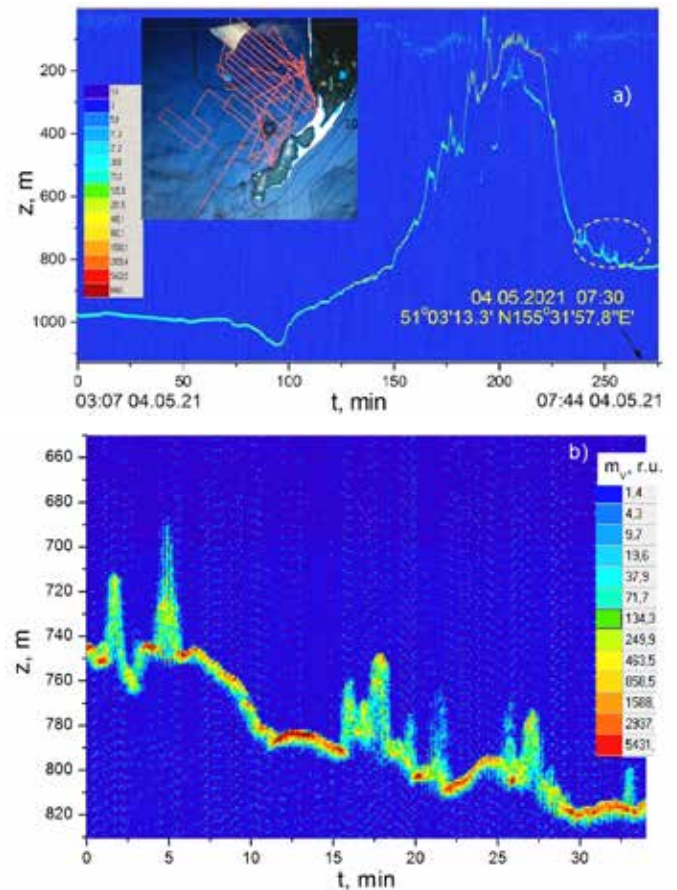


Рис. 4. Глубоководные аномалии рассеяния звука, зарегистрированные вблизи о-ва Атласова ночью 04.05.2021 г.

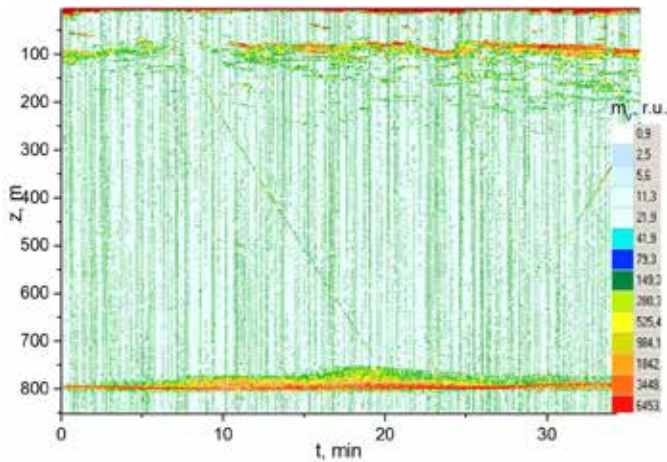


Рис. 5. Акустическая визуализация прохождения пробоотборника через неоднородность 04.05.2021 г.

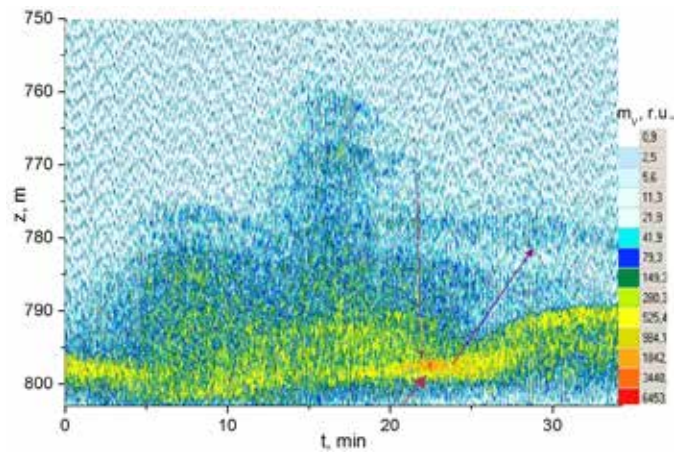


Рис. 6. Подробная структура рассеяния звука вблизи дна на неоднородности, представленной на рис. 5

было проведено для излучения с одновременной регистрацией сигналов рассеяния звука с применением различных типов АЦП, указанных выше.

Результаты измерений рассеяния звука на частоте 25 кГц приведены на рис. 3–6 для различных трасс вблизи о-ва Парамушир и о-ва Атласова. На врезке рис. 5,а показаны типичные трассы, по которым проводились непрерывные исследования рассеяния звука. На графиках здесь и ниже приведены величины для коэффициента рассеяния звука  $m_r$  в относительных единицах (г.у.). Обсуждение абсолютных значений с учетом калибровок по методикам, изложенным в разделе 2, будет представлено в разделе 4.

Из результатов, представленных на рис. 3 и 5 видны придонные неоднородности достаточно больших размеров, достигающих в высоту 40–60 м. Регистрация проводилась с помощью эхолота Furuno FCV-1150 на частоте 25 кГц. Длительность импульса излучения была 1.5 мс, напряжение, подаваемое на излучатель, составляло 600 В. Использовался судовой излучатель от эхолота ELAC с рабочей частотой ~ 12 кГц, который остался на судне после выхода из строя эхолота ELAC. Угловая ширина характеристики направленности излучения на частоте 25 кГц составляла около  $9^0-10^0$ .

Происхождение неоднородностей неизвестно. Вблизи одной такой неоднородности были проведены работы по отбору грунта. На рис. 5 показана структура рассеяния звука во всей толще моря, включая акустическую визуализацию прохождения пробоотборника через неоднородность. Зондирование проходило при дрейфе судна менее 1 узла. На рис. 6 прохождение пробоотборника через неоднородность показано подробно и траектория обозначена стрелками. Моменты взятия пробы на дне показаны красным цветом, где наблюдалось резкое усиление отражения

звуча по сравнению с окружающими структурами.

Из рис.6 видно, что при прохождении пробоотборника не происходило видимого нарушения структуры неоднородности. Последнее позволяет предположить, что неоднородность состоит из поднимающихся со дна газовых пузырьков, рассеяние звука на которых удастся зафиксировать. Пробоотборник свободно проходит через пелену пузырьков, существенно не нарушая ее структуру.

Таким образом, в качестве рабочей гипотезы происхождения выявленных придонных неоднородностей предлагается гипотеза придонных пузырьковых облаков, поднимающихся со дна, которые сродни известным из литературы газовым факелам. Необычность таких структур заключается в существенно меньшем вертикальном размере по сравнению с типичными ГФ.

Придонная неоднородность со структурой несколько иного типа была обнаружена в Татарском проливе в ноябре 2020 г. в рейсе № 61 НИС «Академик Опарин». Так, на рис. 7 показано образование небольших размеров на глубине 188 м около дна, которое имеет структуру, отличную от структуры окружающего дна. Указанное изображение было получено в 05:07 26.11.2020 г. в Татарском проливе. Его размеры следующие: высота около 3–4 м, протяженность по горизонтали около 400 м.

Таким образом, на больших глубинах вблизи дна были обнаружены локальные придонные неоднородности, четко отличающиеся по своим рассеивающим и отражающим акустическим характеристикам от окружающих донных структур. Как правило, такие неоднородности располагались на глубинах больше 500 м, в основном глубина составляла около 800 м. Характерная высота неоднородностей составляет 30–60 м. При этом горизонтальный масштаб имел

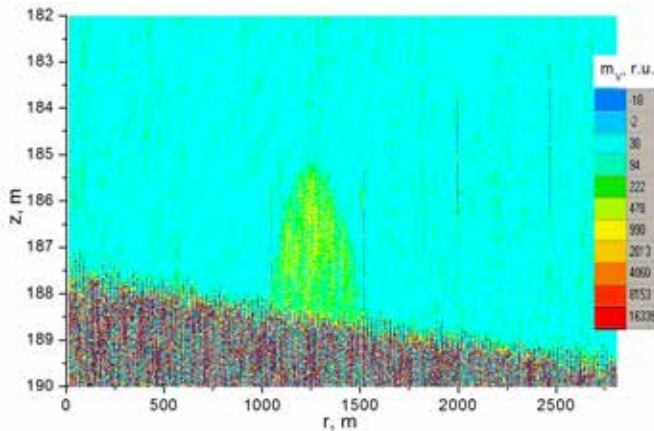


Рис. 7. Рассеяние звука на придонной неоднородности, полученное в 05:07 26.11.2020 г. в Татарском проливе

большой разброс: от 100 м для небольших по высоте неоднородностей около 30 м до более 500 м.

#### 4.2. Рассеяние звука на Парамуширском газовом факеле

Как известно, вблизи о-ва Парамушир в середине 1980-х гг. впервые был обнаружен подводный газовый факел [2]. В данной экспедиции были предприняты поиски этого ГФ для более детального изучения его структуры, а также для сравнения с обнаруженными глубоководными неоднородностями, представленными выше на рис. 3–6. На рис. 8. представлено изображение ГФ, полученное при движении судна со скоростью около 8 узлов в различное время: а) 16.05.2021 г. в 08:33 в точке с координатами 50°30'503N, 155°19'2116E; б) 18.05.2021 г. в 21:08 в точке с координатами 50°30'503N, 155°19'206E. Первые – это координаты знаменитого Парамуширского факела [2].

При остановке судна над ГФ, а затем в дрейфе со скоростью около 1 узла удалось получить более детальное изображение Парамуширского ГФ, изображение которого изменялось в результате дрейфа и эволюции самого факела. Это изображение представлено на рис. 9.

Из рис. 9 видна сложная структура газового факела. Важным обстоятельством является то, что под ярким изображением хорошо просматривается дно. Это, на наш взгляд, может свидетельствовать о том, что основное ядро уже прошло в самом начале дрейфа, и в дальнейшем мы видим только изображение рассеяния на пузырьках, которые поднимаются на высоту до 200 м над дном и исчезают вследствие направленной газовой диффузии из пузырьков. Горизонтальный масштаб ГФ можно оценить по полученным изображениям на ходу судна и в дрейфе.

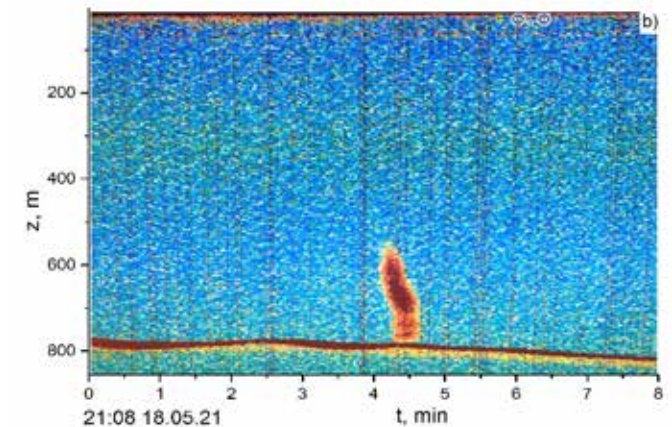
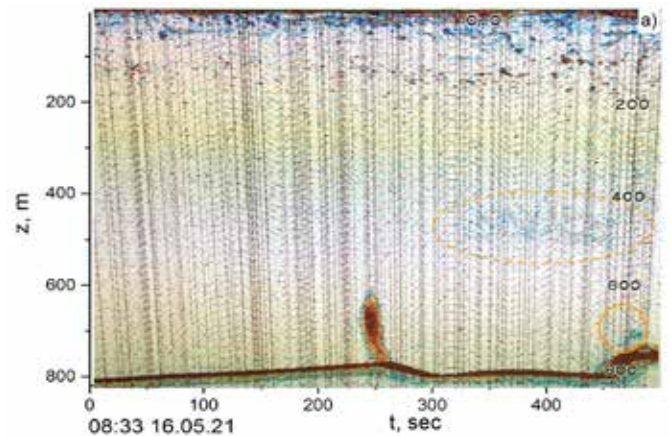


Рис. 8. Изображение квазистационарного Парамуширского ГФ, полученное на ходу судна в различное время: а) 16.05.2021 г. в 08:33 в точке с координатами 50°30'503N, 155°19'2116E; б) 18.05.2021 г. в 21:08 в точке с координатами 50°30'503N, 155°19'206E

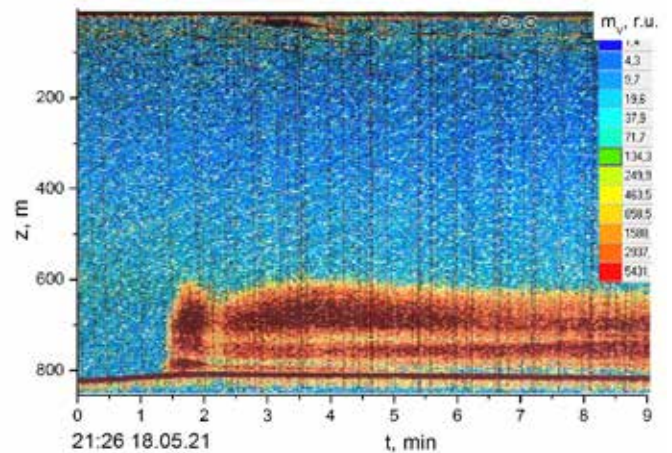


Рис. 9. Изображение факела в квазистационарном состоянии, полученное 18.05.2021 г. в дрейфе судна со средней скоростью меньше 1 узла

Он оказывается небольшим по сравнению с горизонтальным масштабом глубоководных неоднородностей, полученных вблизи о-ва Атласова, и составляет не более 50–100 м.

### 5. Обсуждение результатов и оценки концентрации пузырьков

Представленные выше экспериментальные результаты по измерениям коэффициента рассеяния звука на частоте 25 кГц были взяты за основу для оценки концентрации пузырьков и объемной концентрации свободного газа, заключенного в придонных неоднородностях. Рассматривались 2 основных предположения: 1) размеры пузырьков вблизи дна достаточно большие ~ 1–7 мм; 2) имеется одновременно как нерезонансное высокочастотное рассеяние, так и резонансное рассеяние на высокочастотной ветви функции распределения пузырьков  $g(R)$ . Для оценок были взяты 2 типа функции  $g(R)$  – гауссовская и полуэмпирическая вида (11). Цель – оценить вклад нерезонансного и резонансного вклада, чтобы на основе полученных измерений коэффициента рассеяния звука на одной частоте 25 кГц более корректно решить обратную задачу оценки концентрации пузырьков и объемной концентрации свободного газа.

Вычисления по экспериментальным данным коэффициента рассеяния звука, количества пузырьков со средним размером  $\bar{R} \sim 4$  мм и объемной концентрации газа в пузырьках  $x$  в случае нерезонансного рассеяния, выполненные по формулам (8–10), представлены для случая придонной неоднородности, изображенной на рис. 6. На рис.10 представлено распределение концентрации пузырьков  $N(z,t)$  с размером  $\bar{R}$  в придонной неоднородности. Как видно из рис.10, величина  $N(z,t)$ , определяющая объемную плотность, достаточно мала. Однако следует учитывать общий объем среды, заключенный в импульсном рассеивающем объеме  $V_{imp} \sim (\pi/2)z(ct/2)^2$ , который на глубине 800 м составляет около 1000 м<sup>3</sup>.

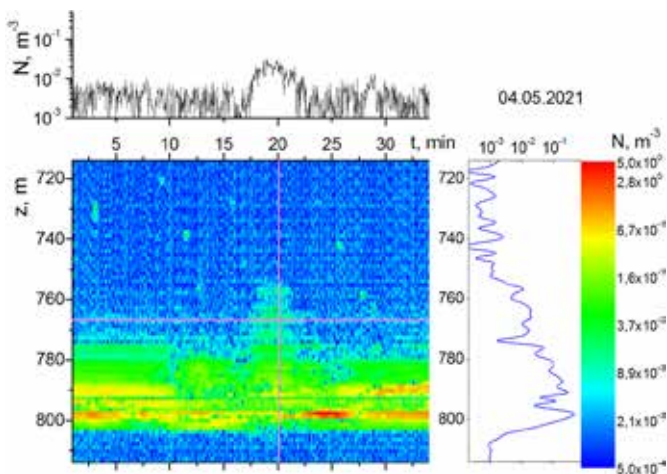


Рис. 10. Распределение концентрации пузырьков  $N(z,t)$  с размером  $R \sim 4$  мм в неоднородности вблизи дна

Тогда оказывается, что одновременно в импульсном объеме вблизи дна находятся десятки и сотни пузырьков, эффективно рассеивающих падающий на них акустический импульс.

На рис. 11 представлено распределение объемной концентрации газа в пузырьках  $x$ , вычисленное по формуле (10). Видно, что в пределах 30–40 м над дном величина  $x$  достаточно сильно превышает фоновую концентрацию. В итоге оказывается, что непосредственно вблизи дна она может достигать значений  $x \sim 10^{-7} \div 10^{-6}$ . Как известно, при таких концентрациях начинает сильно изменяться эффективная скорость звука и резко возрастает коэффициент поглощения звука [17, 21, 22]. Следует подчеркнуть, что подобные неоднородности на трассах распространения звука приводят как к увеличению потерь при распространении, так и к изменению структуры поля [21, 22]. Важно также обратить внимание на то, что подобные неоднородности наиболее сильно будут влиять на структуру низкочастотных полей, для которых эффективная скорость звука определяется нерезонансными пузырьками, и в пределе низких частот для них пропадает частотная зависимость.

Рассмотрим теперь вклад резонансного рассеяния на частоте 25 кГц при условии, что распределение пузырьков по размерам  $g(R)$  достаточно гладкое и определяется формулой (11). С помощью формул (5) и (6) определяем  $g(R(\omega))$ , а затем вычисляем концентрацию пузырьков  $N_\omega = \int g(R_\omega) dR_\omega$  и  $x_\omega = (4\pi/3) \int R_\omega^3 g(R_\omega) dR_\omega$ . Получаем следующий результат:

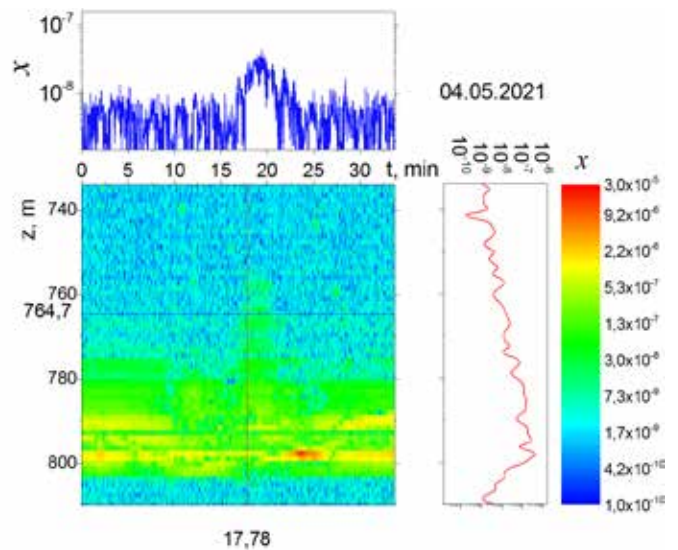


Рис. 11. Распределение объемной концентрации газа в пузырьках  $x$  в неоднородности вблизи дна



$$N_{\omega} = 2(m_V)_{\omega} \delta^2 / (\pi R_{\omega}^2), \quad x_{\omega} = 8(m_V)_{\omega} R_{\omega} \delta / 3. \quad (12)$$

Взяв отношение нерезонансных и резонансных величин, получаем соотношения

$$N / N_{\omega} = \pi / (2\delta^2)(R_{\omega} / \bar{R})^2, \quad x / x_{\omega} = (\pi / 2\delta)(\bar{R} / R_{\omega}).$$

Из полученных соотношений следует оценка  $N / N_{\omega} \sim 10$ ,  $x / x_{\omega} \sim 50$ , свидетельствующая о незначительности вклада резонансного рассеяния при типичных характеристиках функции  $g(R)$ , известных из литературных источников. Таким образом, основной вклад в результаты вносит нерезонансное рассеяние, позволяющее делать оценки коэффициента рассеяния звука, количества пузырьков со средним размером  $\bar{R} \sim 4$  мм и объемную концентрацию газа в пузырьках  $x$  по формулам (8–10).

## 6. Основные выводы и заключение

В Охотском море вблизи о-ва Атласова обнаружены глубоководные придонные неоднородности больших размеров, четко отличающиеся по своим рассеивающим и отражающим акустическим характеристикам от окружающих донных структур. Как правило, такие неоднородности располагались на глубинах больше 500 м, в основном глубина составляла около 800 м. Характерная высота неоднородностей составляет 30–60 м. При этом горизонтальный масштаб имел большой разброс: от 100 м до более 500 м для небольших по высоте неоднородностей около 30 м.

Похожий объект был обнаружен в Татарском проливе, но он располагался на меньшей глубине около 190 м и имел небольшую высоту около 3–4 м при достаточно большом горизонтальном масштабе около 400 м.

Получены оценки структуры Парамуширского ГФ. Горизонтальный масштаб оказывается неболь-

шим по сравнению с горизонтальным масштабом глубоководных неоднородностей, полученных вблизи о-ва Атласова и составляет не более 50–100 м. Следует отметить, что хотя вертикальный масштаб Парамуширского ГФ отличается от глубоководных неоднородностей, обнаруженных вблизи о-ва Атласова, однако по величине коэффициента рассеяния звука они достаточно близки. Последнее свидетельствует о том, что природа этих придонных акустических неоднородностей обусловлена близкими механизмами, а именно – процессом выхода газа в форме пузырьков из донных осадков.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о наличии аномального рассеяния звука на больших глубинах вблизи дна, что позволяет предполагать там разновидность ГФ, но с меньшей объемной производительностью источников выхода газа из донных осадков, что дает характерный вертикальный масштаб, примерно в 3–5 раз меньший по сравнению с классическим ГФ. При этом они занимают более значительную площадь дна, превышающую размеры классического ГФ в несколько раз.

Показано также, что наличие в обнаруженных неоднородностях достаточно больших концентраций пузырьков может приводить к значительным изменениям эффективной скорости звука и резкому возрастанию коэффициента поглощения звука [17, 21, 22]. Следует подчеркнуть, что подобные неоднородности на трассах распространения звука могут приводить как к увеличению потерь при распространении, так и к изменению структуры поля [21, 22]. Наиболее сильно это будет влиять на структуру низкочастотных акустических полей.

Работа выполнена в рамках проектов госзадания 0211-2021-0002, рег. № АААА-А20-120021990003-3; 0211-2021-0006 рег. № 121021500055-0; 0211-2021-0015, рег. № 121021500053-6.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kienle J., Roederer J.G., Shaw G.E. Volcanic event in Soviet Arctic // EOS. 1983. V. 64, No. 20. P. 377.
2. 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.П., Бараш М.С., Валяшко Г.М., Демина Л.Л. Подводный газовый источник к западу от о-ва Парамушир // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 795–800.
3. Hovland M., Judd A.G., Burke P.A. The global flux of methane from shallow submarine sediments // Chemosphere. 1993. Vol. 26. P. 559–578.
4. Обжиров А.И. История открытия газогидратов в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2006. С. 72–80.
5. Кэрролл Дж. Гидраты природного газа. М.: Технопресс, 2007. 316 с.
6. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment // Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2007. 475 p.
7. Юсупов В.А., Салюк А.Н., Карнаух В.Н., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // Докл. РАН. 2010. Т. 430, № 6. С. 820–823.
8. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2009. 416 с.
9. Муякшин С.И., Заутер Э. Дистанционный акустический метод определения производительности подводного источника газовых пузырьков // Океанология. 2010. Т. 50, № 6. С. 1045–1051.
10. Саломатин А.С., Юсупов В.И., Ли В.Я. Дистанционные акустические исследования водной толщи и дна океана: аппаратура и методика / В кн. Дальневосточные моря России: в 4 кн. / гл.ред. акад. В.А. Акуличев. Кн.4. Физические методы исследования/ отв.ред. Г.И. Долгих. М.: Наука, 2007. С. 87–110.

11. 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, N № 6. С. 635–644.
12. Акуличев В.А., Буланов В.А. Исследования неоднородностей морской среды методами акустического зондирования / В кн. Дальневосточные моря России: в 4 кн. / гл.ред. акад. В.А. Акуличев. Кн.4. Физические методы исследования/ отв.ред. Г.И.Долгих. М.: Наука 2007. С. 129–231.
13. Naugolnykh K.A., Ostrovsky L.A. Nonlinear Wave Processes in Acoustics. Cambridge University Press, UK, 1998; 298 p.
14. 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.
15. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 414 с. ISBN 978-5-9909943-8-6, <https://www.poi.dvo.ru/node/470>
16. Акуличев В.А., Буланов В.А., Кленин С.А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде // Акуст. журн. 1986, Т. 32, вып. 3. С. 289–295.
17. 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 J. Ocean. Eng. 2013. Vol. 38. P. 632–641. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2257573>.
18. 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 Q3
19. Валитов М.Г., Ли Н.С., Шакиров Р.Б., Пономарева А.Л., Телегин Ю.А., Буланов В.А., Прошкина З.Н., Окулов А.К., Иваненко А.Н., Калгин В.Ю., Рыжманова Я.В., Жуковин А.Ю., Бовсун М.А., Максеев Д.С. 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
20. Акуличев В.А., Буланов В.А. О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446, № 2. С. 212–215.
21. Liu R., Li Z. The effects of bubble scattering on sound propagation in shallow water // J. Mar. Sci. Eng. 2021. Vol. 9. P. 1441. <https://doi.org/10.3390/jmse9121441>.
22. Акуличев В.А., Буланов В.А., Бугаева Л.К. Влияние пузырьков облаков в приповерхностном слое океана на затухание звука и структуру акустического поля // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2(28). С. 62–69. DOI:10.25808/24094609.2019.28.2.008.

## Об авторах

**БУЛАНОВ Владимир Алексеевич**, д. ф.-м. н. с.н.с.,  
заведующий лабораторией  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки.  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
**Адрес:** 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43  
**Область научных интересов:** Физическая акустика,  
нелинейная акустика, акустика океана  
**Тел.:** +7(423)2374913, **факс:** +7(423)2312573  
**E-mail:** bulanov@poi.dvo.ru  
**ORCID:** 0000-0002-5504-9042

**ВАЛИТОВ Максим Георгиевич**, к. г.-м. н., заведующий  
лабораторией  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки.  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
**Адрес:** 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43  
**Область научных интересов:** геофизические исследования,  
моделирование глубинной структуры земной коры по  
геофизическим данным, изучение приливных вариаций силы  
тяжести  
**Тел.:** +7(423)2312839  
**E-mail:** valitov@poi.dvo.ru  
**ORCID:** 0000-0001-5442-5969

### Для цитирования:

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. № 3 (41). С. 67–78. DOI: 10.37102/1992-4429\_2022\_41\_03\_06. EDN: XNJVSI.

**КОРСКОВ Игорь Владимирович**, к. г.-м. н., с.н.с.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки.  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
**Адрес:** 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43  
**Область научных интересов:** Изучение распространения,  
затухания и рассеяния звука в море  
**Тел.:** +7(423)2374913  
**E-mail:** i\_korskov@poi.dvo.ru  
**ORCID:** 0000-0001-6590-9598

**ШАКИРОВ Ренат Белалович**, д. г.-м. н., доцент, заместитель  
директора по научной работе  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки.  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
**Адрес:** 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43  
**Область научных интересов:** морская геология и геофизика  
**Тел.:** +7(423)2320501, **факс:** +7(423)2312573  
**E-mail:** en@poi.dvo.ru  
**ORCID:** 0000-0003-1202-0351