

УДК 534.231

ОЦЕНКА ПРОТЯЖЕННОСТИ ОБЛАСТЕЙ ВОДОПОДОБНОГО ДНА НА АКУСТИЧЕСКИХ ТРАССАХ В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2024 г. Д. Д. Сидоров^{1,*}, С. Д. Боджона^{1,2,**}, В. Г. Петников^{1,***}, А. А. Луньков^{1,2,****}

Представлено академиком РАН О.В. Руденко 14.12.2023 г.

Поступило 14.12.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принято к публикации 07.02.2024 г.

Аналитически и в рамках численного моделирования рассмотрена возможность дистанционной оценки размеров областей водоподобных осадков в мелководных шельфовых зонах по потерям при дальнем распространении низкочастотного звука. Под водоподобными понимаются осадки, скорость звука в которых близка к скорости звука в воде, но имеющие значительно большую плотность. Проведен модельный статистический анализ средних по глубине потерь при распространении звука на акустических трассах фиксированной длины в одном из районов Карского моря с известной структурой верхнего слоя дна, которое включает в себя водоподобные области. Продемонстрирована линейная зависимость потерь при распространении звука от протяженности областей водоподобных осадков на низких частотах. На основе этого результата предложена методика дистанционной интегральной оценки горизонтального размера области водоподобных осадков по данным акустического зондирования.

Ключевые слова: потери при распространении звука, арктический шельф, водоподобные донные осадки, дистанционное зондирование, вертикальная цепочка гидрофонов

DOI: 10.31857/S2686740024020137, EDN: KGEVKC

Арктический район Мирового океана привлекает все большее внимание исследователей из различных областей науки. Серьезной причиной для такого внимания является уменьшение площади многолетнего льда, что открывает возможности к изучению и освоению все более северных районов океана в отсутствие ледового покрова. Существенно, что в Арктических шельфовых зонах сосредоточены рекордные запасы углеводородного сырья, и здесь же находятся важные транспортно-логистические узлы, включая Северный морской путь. Одним из методов исследования Арктического шельфа

является дистанционное акустическое зондирование, возможности которого во многом определяются потерями при дальнем волноводном распространении звука на расстояния много большие, чем глубина акватории. Потери, или затухание звука с расстоянием в первую очередь зависят от характеристик морского дна. Верхний слой донных осадочных пород на Арктическом шельфе крайне неоднороден. Этот факт подтверждают результаты инженерной сейсморазведки в одном из районов Карского моря, где удалось получить трехмерное распределение скорости звука в верхнем слое донных осадков в объеме $37\,000 \times 20\,000 \times 80$ м (рис. 1а) [1]. Полученные данные позволили выявить области водоподобных осадков, где скорость звука в дне близка к скорости звука в воде. (При этом плотность дна в этих осадках остается большей, чем плотность воды.) Указанные области выделены черным цветом на рис. 1а. При распространении звука над водоподобными осадками значительная часть

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: sidorov.dan.dmit@gmail.com

**E-mail: devibodjona@yandex.ru

***E-mail: petniko@kapella.gpi.ru

****E-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

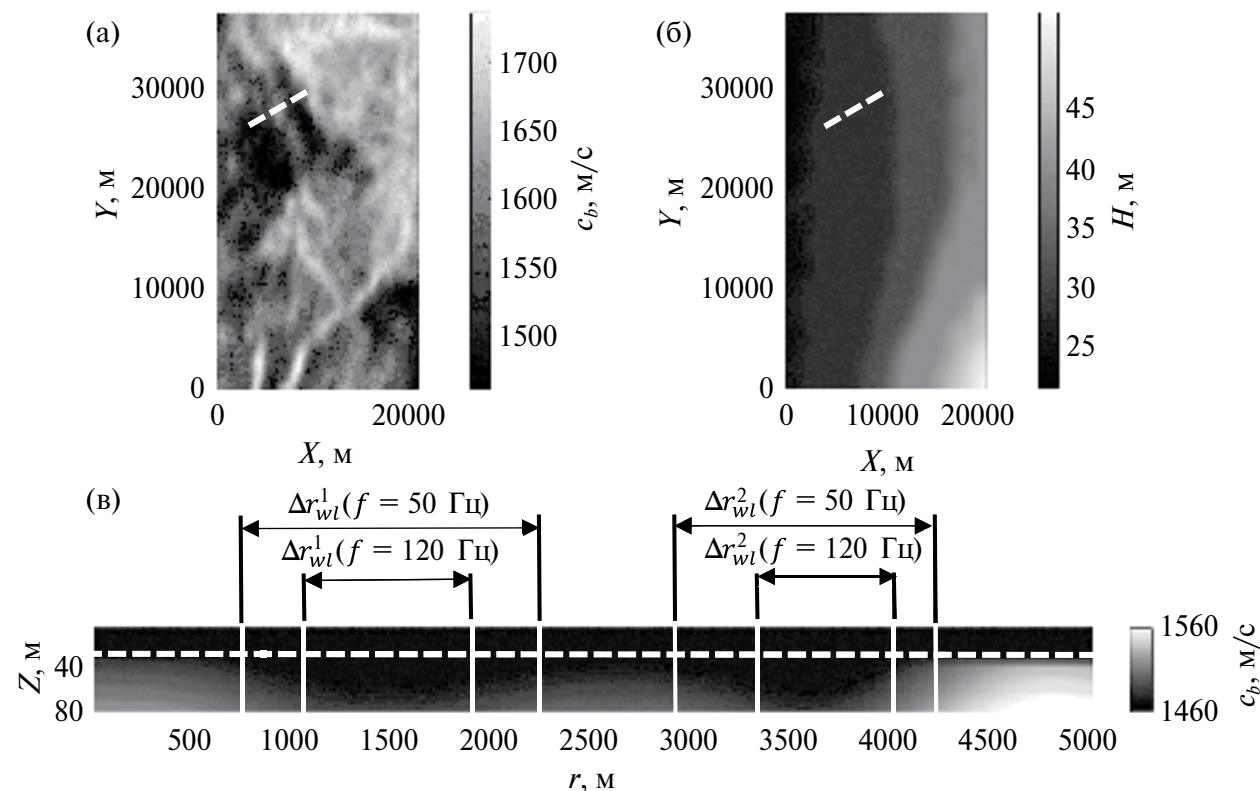


Рис. 1. а — Разрез поля скорости звука в дне $c_b(x, y, z)$ на глубине $z = 55$ м от поверхности воды; б — батиметрия $H(x, y)$ в одном из районов Карского моря; в — вертикальный разрез скорости звука вдоль акустической трассы, отмеченной штриховой линией на (а) и (б), с указанием границ участков водоподобного дна согласно критерию (5) для частоты $f = 50$ и 120 Гц. Данные для одного из районов Карского моря.

энергии безвозвратно «утекает» из водного слоя в дно, что обусловлено малым контрастом скоростей звука между граничащими средами и приводит к аномальному усилению затухания звука [1].

Обнаружение областей водоподобных осадков может иметь важное значение для оперативной океанологии. Трехмерная сейсморазведка и пробное бурение являются очень информативными, но весьма затратными методами. С их помощью затруднительно осуществлять быструю оценку параметров верхнего слоя дна в нужном районе, а также отслеживать их изменение с течением времени. Разработка новых методик, позволяющих дистанционно и оперативно определять наличие и протяженность областей водоподобных осадков, является актуальной задачей.

В настоящей работе проводится аналитическое и численное исследование распространения низкочастотного звука в шельфовой зоне с неоднородным дном с целью обнаружения связи между потерями при распространении звука и

протяженностью областей водоподобного дна, что важно при разработке методик крупномасштабного акустического мониторинга Арктического шельфа. Для исследований выбиралась модель мелководной части Карского моря (рис. 1).

Для упрощенной аналитической оценки потерь при распространении применяется метод нормальных волн (мод). Будем рассматривать такие звуковые частоты, при которых в волноводе постоянной глубины H имеется только одна энергонесущая мода. На Арктическом шельфе, средняя глубина которого не превышает 50 м, такая ситуация не является экзотической и может реализовываться даже на звуковых частотах (более 20 Гц). В адиабатическом приближении комплексная амплитуда звукового давления, сформированного первой модой, в конце неоднородной трассы на глубине z записывается как

$$p(z; R) = A_1(z) \exp \left(i \int_0^R \xi_1(r) dr \right), \quad (1)$$

где $A_1(z)$ — амплитуда 1-й моды. (Здесь и далее при анализе предполагается, что величина $A_1(z)$

не зависит от длины акустической трассы R , т.е. ослабление звукового поля, обусловленное цилиндрическим расширением фронта волны, скомпенсировано.) $\xi_1(r) = q_1(r) + i\gamma_1(r)/2$ — горизонтальное волновое число 1-й моды с учетом затухания $\gamma_1(r)/2$. Неоднородность вдоль трассы обусловлена только неоднородной структурой дна. Предположим, что дно состоит из чередующихся участков водоподобных и неводоподобных осадков. Общая длина участков первого типа составляет Δr_{wl} , второго — $\Delta r_{nw} = R - \Delta r_{wl}$.

Коэффициент затухания первой моды для водоподобных участков будем считать независимым от расстояния r . Обозначим его $\gamma_{wl}/2$. Аналогично для неводоподобных — $\gamma_{nw}/2$. Ранее было показано [2], что коэффициент γ_{wl} минимум на порядок превышает γ_{nw} . Это связано с тем, что в области водоподобного дна первая мода является вытекающей. Для рассматриваемых условий Карского моря $\gamma_{wl} \sim 10^{-3}$ 1/м, $\gamma_{nw} \sim 10^{-4}$ 1/м.

Средние по глубине потери при распространении относительно опорного расстояния r_0

$$TL = -10 \lg \left(\frac{\int_0^{H(R)} |p(z; R)|^2 dz}{\int_0^{H(r_0)} |p_0(z; r_0)|^2 dz} \right), \quad (2)$$

с учетом неравенства $\gamma_{wl} \gg \gamma_{nw}$ можно представить как

$$TL = TL_0 + (10\gamma_{wl} \lg e) \Delta r_{wl}, \quad (3)$$

где TL_0 — потери в отсутствие водоподобных осадков на трассе. Из (3) следует, что в случае распространения низкочастотного звука в одномодовом режиме средние потери TL линейно зависят от протяженности области водоподобных осадков Δr_{wl} . Выражение (3) будет справедливо, если водоподобные области обладают примерно одинаковыми средними характеристиками: скоростью звука c_b , плотностью ρ_b и коэффициентом поглощения α_b .

Здесь следует сказать несколько слов о выборе критерия водоподобности донных осадков. В настоящей работе этот критерий привязан к особенностям волноводного распространения звука в мелком море. Дно считается водоподобным,

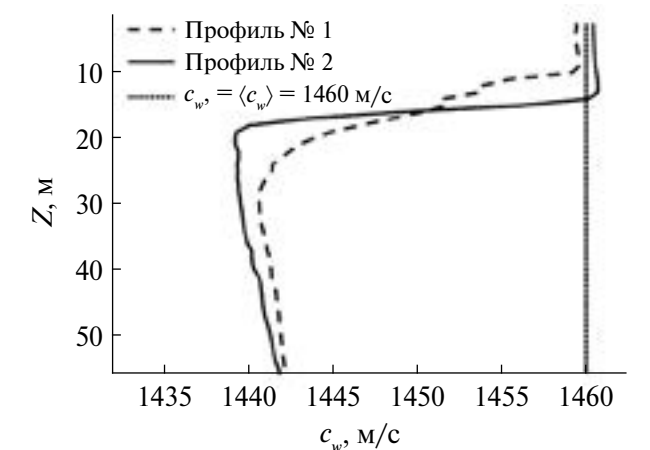


Рис. 2. Профили скорости звука в Карском море.

если средняя по глубине скорость звука $\langle c_b \rangle_\lambda$ в верхнем слое осадков толщиной λ (λ — длина звуковой волны) меньше фазовой скорости первой моды $V_{ph,1}$:

$$\langle c_b \rangle_\lambda < V_{ph,1}. \quad (4)$$

Это условие эквивалентно тому, что первая мода является вытекающей — угол скольжения ее бриллюэновского луча больше угла полного внутреннего отражения на границе вода/дно. В волноводе, имеющем однородный водный слой толщины H со скоростью звука (c_w), первая мода на частоте ω становится вытекающей, когда максимум ее вертикального профиля смещается на дно. При этом действительная часть горизонтального волнового числа моды может быть представлена как:

$$q_1 \approx \sqrt{(\omega / c_w)^2 - (\pi / 2H)^2}.$$

Пользуясь этим выражением и определением фазовой скорости моды $V_{ph,1} = \omega / q_1$, неравенство (4) приобретает вид

$$\langle c_b \rangle_\lambda < \frac{c_w}{\sqrt{1 - (\pi c_w / 2\omega H)^2}}. \quad (5)$$

Для Карского моря ($c_w = 1460$ м/с, $H = 30$ м, $f = \omega / 2\pi = 50$ Гц) отличие средней скорости звука $\langle c_b \rangle_\lambda$ в водоподобных осадках от скорости звука в воде c_w не превышает 3% и уменьшается с частотой. Критерий (5) будет использован далее при обработке данных о скорости звука в дне.

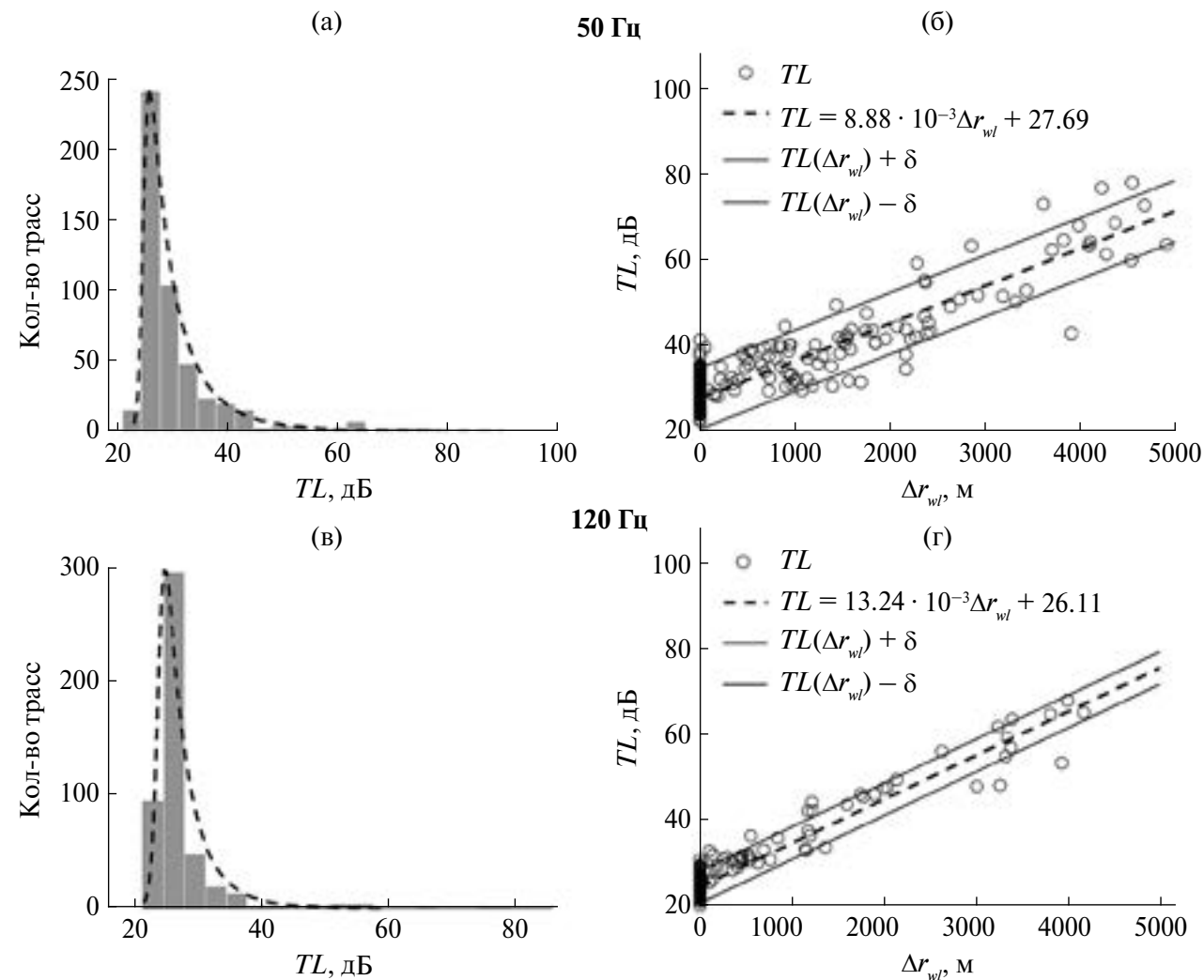


Рис. 3. а, в – Гистограммы потерь при распространении звука TL с огибающими в виде функций Берра 12-го типа; б, г – зависимости потерь при распространении TL от протяженности водоподобных осадков Δr_{wl} с аппроксимирующими прямыми (штриховые линии) и доверительными интервалами δ (сплошные линии) для вероятности 95%. Статистика для 500 акустических трасс длиной $R = 5$ км. Верхний ряд – частота $f = 50$ Гц, нижний – $f = 120$ Гц. Скорость звука в водном слое постоянна – $c_w = 1460$ м/с.

Проверим аналитически полученную линейную связь (3) с помощью прямого численного моделирования методом широкоугольного параболического уравнения (код RAM [3]) для условий Карского моря с известной пространственно-неоднородной структурой поля скорости звука $c_b(x, y, z)$ в донных осадках (рис. 1а). Поверхность дна имеет небольшой наклон: глубина $H(x, y)$ плавно изменяется от 25 до 50 м (рис. 1б). Для получения зависимости потерь TL от протяженности Δr_{wl} в прямоугольнике 37×20 км случайным образом выбираются $N = 500$ трасс длиной $R = 5$ км. Пример

вертикального разреза скорости звука вдоль одной из таких трасс, на которой присутствуют водоподобные осадки, изображен на рис. 1в. Белыми штриховыми линиями показаны границы водоподобного дна по критерию (5) для частот $f = 50$ и 120 Гц.

Анализ результатов пробного бурения показал [1], что пространственная изменчивость плотности дна ρ_b незначительная, поэтому при численном моделировании берется постоянное значение $\rho_b = 1850$ кг/м³. Коэффициент затухания звука α_b в осадках принимается равным

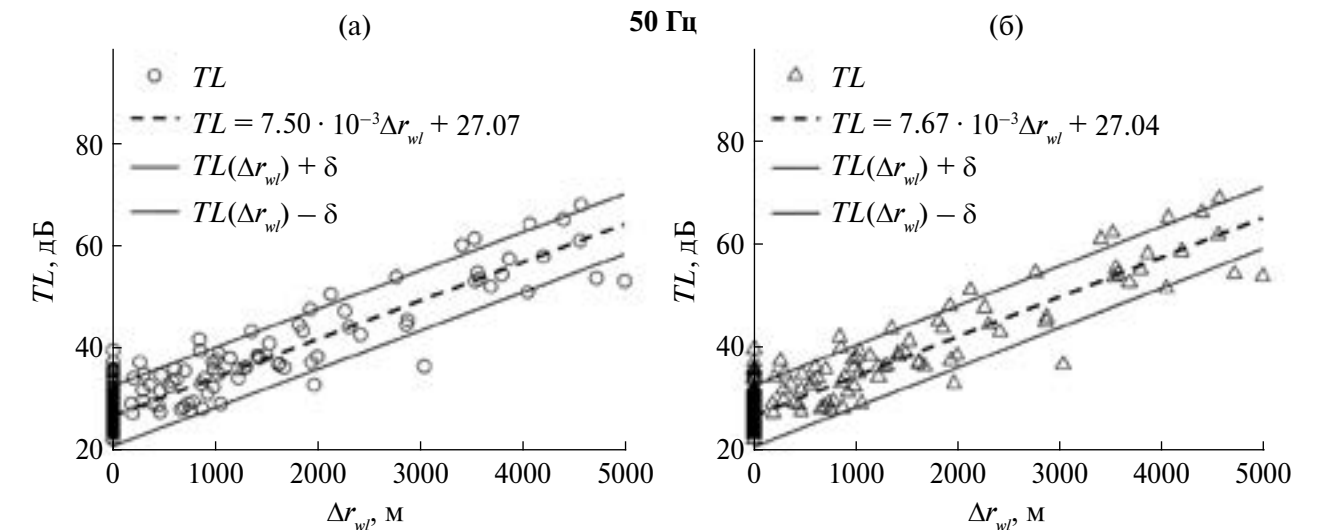


Рис. 4. То же, что и на рис. 3б, но для градиентных профилей скорости звука в воде: а – Профиль № 1, б – Профиль № 2, которые показаны на рис. 2.

0.33 дБ/λ. Плотность воды $\rho_w = 1000$ кг/м³. Рассматривается два типа вертикальных профилей скорости звука в водном слое (рис. 2): постоянный со скоростью $c_w = 1460$ м/с и градиентный $c_w = c_w(z)$.

В численных экспериментах в начале трассы помещается тональный источник звука частоты $f = 50$ или 120 Гц на глубине $z_s = 14$ м, а в конце – вертикальная линейная антенна [4], которая перегораживает всю толщину водного слоя и используется, во-первых, для выделения первой волноводной моды и, во-вторых, для получения средних по глубине потерь при распространении TL согласно (2).

Рассмотрим случай постоянной скорости звука в водном слое. Гистограмма потерь при распространении на частоте $f = 50$ Гц, построенная по 500 трассам, приведена на рис. 3а. Видно, что большинство потерь попадает в диапазон 25–35 дБ, что главным образом соответствует дну без водоподобных участков. Однако имеется и ненулевой “хвост”, который простирается до значений 80 дБ. Огибающая полученной гистограммы хорошо аппроксимируется функцией Берра 12-го типа (Burr Type XII distribution [5]). На рис. 3б построена зависимость потерь при распространении TL от суммарной протяженности водоподобных осадков Δr_{wl} . Кружками отмечены результаты для отдельных трасс, штриховой линией – линейная аппроксимация, сплошными линиями – границы доверительного интервала

для вероятности 95%. Конгломерат кружков при $\Delta r_{wl} = 0$ км отвечает трассам без водоподобных осадков. Остальные кружки достаточно хорошо ложатся вдоль аппроксимирующей прямой с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.85$ (см. табл. 1), что подтверждает адекватность формулы (3). Выпадение некоторых точек из тренда связано с тем, что водоподобные области имеют не совсем одинаковые характеристики, и что правая часть в критерии (5) вычислялась только для одной наиболее распространенной глубины акватории $H = 30$ м. Результаты для частоты $f = 120$ Гц (рис. 3в и 3г) демонстрируют меньший разброс ($R^2 = 0.91$), но и меньшее количество точек, отвечающих водоподобному дну. Это обусловлено тем, что с увеличением частоты под критерий (5) попадают все менее протяженные области, что продемонстрировано на рис. 1в. В ситуации, когда профиль скорости звука является градиентным, хорошая корреляция сохраняется только для частоты $f = 50$ Гц (см. рис. 4 и табл. 1).

Исходя из результатов статистической обработки модельных данных для шельфовой зоны глубиной $H = 25$ –50 м можно сделать вывод о том, что при потерях TL более 35 дБ (без учета цилиндрического расхождения фронта) на расстоянии $R = 5$ км и частотах $f = 50$ –120 Гц на акустической трассе присутствуют участок(-ки) водоподобных осадков общей протяженностью не менее $\Delta r_{wl} = 1$ км. Наибольшая надежность оценки достигается при постоянстве скорости звука в водном слое.

Таблица 1. Квадрат коэффициента линейной корреляции R^2 на частотах 50 и 120 Гц для различных профилей скорости звука в воде

	$c_w = 1460$ м/с	Профиль № 1	Профиль № 2
50 Гц	0.85	0.83	0.83
120 Гц	0.91	0.48	0.50

Ожидается, что при учете в критерии (4) или (5) изменения глубины вдоль трасс и вертикального профиля скорости звука может быть получена наилучшая корреляция между TL и Δr_{wl} .

Обнаруженные в данной работе линейные зависимости потерь при распространении от протяженности областей водоподобных осадков представляют собой удобные для практики геоакустические характеристики отдельных мелководных районов арктического шельфа, позволяющие по средним по глубине потерям оценивать размеры таких областей. Однако эти линейные соотношения носят универсальный характер и слабо зависят от распределения скорости звука в водном слое только на низких частотах, когда длина акустической волны сравнима с глубиной исследуемой акватории. Для реализации требуется одиночный низкочастотный излучатель и вертикальная приемная цепочка гидрофонов, перекрывающая водный слой по глубине.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья написана по материалам одноименного доклада на 6-й школе-конференции молодых ученых ИОФ РАН “Прохоровские недели”, 2023 г. Доклад был рекомендован к публикации по результатам экспертных оценок как один из лучших.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121, <https://rscf.ru/project/22-72-10121/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 3. С. 342–358.
2. Lunkov A., Sidorov D., Petnikov V. Horizontal Refraction of Acoustic Waves in Shallow-Water Waveguides Due to an Inhomogeneous Bottom Structure // J. Mar. Sci. Eng. 2021. V. 9. P. 1269.
3. Collins M.D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 93. P. 1736–1742.
4. Лунков А.А., Петников В.Г. Использование вертикальной приемной антенны для геоакустической инверсии в мелководном волноводе с ледовым покровом // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. № 1. С. 78–82.
5. Burr I.W. Cumulative Frequency Functions // Ann. Math. Statist. 1942. V. 13. No. 2. P. 215–232.

ESTIMATION OF WATER-LIKE BOTTOM LENGTH ALONG AN ACOUSTIC TRACK IN SHALLOW WATER

D. D. Sidorov^a, S. D. Bodjona^{a,b}, V. G. Petnikov^a, A. A. Lunkov^{a,b}

^aProkhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Presented by Academician of the RAS O.V. Rudenko

Analytically and within the framework of numerical simulations, remote sensing of the water-like bottom in shallow water based on low-frequency sound propagation loss is considered. Water-like bottom sediments are understood as sediments in which the sound speed is close to the sound speed in water, but having a significantly higher density. A model statistical analysis of depth-averaged transmission loss is carried out for acoustic tracks of a fixed range in one of the areas of the Kara Sea with a known structure of the upper layer of the bottom, which includes water-like areas. A good correlation between low-frequency transmission loss and the length of water-like bottom is demonstrated. Based on this result, a method for remote integral estimation of the water-like bottom size at an acoustic track between a single source and a vertical array of hydrophones is proposed.

Keywords: transmission loss, arctic shelf, water-like bottom sediments, remote sensing, vertical array of hydrophones