

АКУСТИКА ОКЕАНА.  
ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.231

**ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ОКРУЖАЮЩЕГО ШУМА  
В МЕЛКОМ МОРЕ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ ДНА**

© 2025 г. С. Д. Боджона<sup>a,\*</sup>, Д. Д. Сидоров<sup>a,\*\*</sup>, В. Г. Петников<sup>a,\*\*\*</sup>, А. А. Луньков<sup>a,b,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
ул. 2-Бауманская 5, Москва, 105005 Россия

\*e-mail: bodjona@kapella.gpi.ru

\*\*e-mail: sidorov@kapella.gpi.ru

\*\*\*e-mail: petniko@kapella.gpi.ru

\*\*\*\*e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 13.09.2024 г.

После доработки 25.10.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

В рамках численных экспериментов анализируются характеристики низкочастотных шумовых полей в мелководных акустических волноводах с неоднородной структурой донных осадков, в том числе и в присутствии водоподобного дна. Рассматриваются две модели морского дна: идеализированная, с линейным изменением скорости звука в дне вдоль одной из декартовых координат, и реалистичная, где скорость звука в дне зависит от всех трех координат. Последняя модель близка к реальной ситуации в одном из мелководных районов Карского моря. Исследуются шумовые поля от распределенных приповерхностных источников (поверхностное волнение) и сосредоточенного источника (шум судна). Расчеты выполнены с помощью метода широкоугольного параболического уравнения. Получены усредненные горизонтальные и вертикальные характеристики направленности шумового поля поверхностного волнения, а также средние значения интенсивности в зависимости от положения приемной вертикальной антенны и частоты звука. Для областей дна с отличающимися свойствами построены пространственные зависимости уровня локального источника шума. Продемонстрирована возможность обнаружения водоподобных участков дна по записи шума движущегося судна на стационарную вертикальную акустическую антенну. В случае распределенных источников показано, что усредненные характеристики шума слабо зависят от скорости звука в дне.

*Ключевые слова:* акустика мелкого моря, неоднородное дно, ветровое волнение, шум судна, широкоугольное параболическое уравнение

DOI: 10.31857/S0320791925010091, EDN: BQKDQZ

## ВВЕДЕНИЕ

Энергопотребление человечества растет ежегодно, причем первые места в мировом топливно-энергетическом балансе неизменно занимают нефть и природный газ. По статистике около трети мировых запасов углеводородного сырья находится в недрах под водой [1], в частности, в арктических морях, активное освоение которых началось относительно недавно благодаря стремительному таянию льда. Повышенная антропогенная активность в северных акваториях в связи с поиском новых нефтегазовых месторождений и прокладкой транспортных путей служит причиной усиления

окружающего шума, что ставит перед учеными актуальные задачи по оценке его воздействия на подводную фауну и по определению специфики передачи информационных сигналов в этих регионах.

Ранее уже были осуществлены оценки, основанные на волновых [2] (на частотах до 20 Гц) и лучевых (частоты 1–5 кГц) представлениях акустических полей [3] и демонстрирующие, что шумовое поле в океаническом волноводе формируется акваторией площадью в сотни квадратных километров. Экспериментальные данные также позволили установить значительный разброс уровней шума ветрового волнения в мелком море при одинаковом

состоянии морской поверхности и силе ветра, но разных параметрах дна, батиметрии и профилях скорости звука (до 10 дБ) [4]. Однако остается открытым вопрос относительно влияния водоподобных (скорость звука в дне близка к скорости звука в воде  $c_b \approx c_w$ ) участков на формирование шумового поля. Наличие таких участков является специфическим для арктических морей [5], что связано с присутствием газа в осадках.

Исследование распространения звука в акваториях, где толщина водного слоя не превышает несколько десятков метров, показало, что ключевую роль при формировании акустических полей играет донная структура [6–9]. Выявлено, что затухание акустических волн вдоль трассы максимально, если средняя скорость звука верхнего слоя осадков близка к скорости звука в воде даже при постоянных параметрах водного слоя.

Целью данной работы является оценка влияния неоднородной структуры донного слоя при наличии водоподобных областей на характеристики низкочастотных шумовых полей распределенных источников (ветровое волнение) и сосредоточенного источника (судно), проходящего в районе измерений. Они рассматриваются в качестве двух отдельных видов источников шума в мелководной акватории. При формировании шумовых полей будут рассмотрены только узкополосные компоненты спектра в полосе частот 1 Гц с центральными частотами 100 и 500 Гц. Ожидается, что в ходе распространения шума судна в неоднородном волноводе при взаимодействии с водоподобными областями будут наблюдаться осцилляции амплитуды первой волноводной моды [10]. Данный результат может быть использован для локализации водоподобных участков дна.

Следует также отметить, что замысел настоящей статьи появился после изучения фундаментальных результатов член-корреспондента РАН В.А. Зверева (см. [11–12] и цитируемые там работы), посвященные локации на просвет в мелком море. Им впервые была высказана идея о некогерентном накоплении сигналов акустической дифракции на сосредоточенной неоднородности, пересекающей стационарную акустическую трассу между источником и приемником звука. Настоящая статья в известном смысле является развитием этих идей применительно к неподвижным распределенным неоднородностям морского дна и “поворачивающейся” акустической трассе, которая в определенный момент времени пересекает указанные неоднородности.

### 1. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ШУМОВОГО ПОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И СОСРЕДОТОЧЕННОГО ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Моделирование шумового поля ветрового волнения основано на монографии [13]. Ветровое волнение предполагается изотропным. Согласно модели (рис. 1а) в центре круговой области радиуса

$R$  расположена вертикальная приемная антенна, а дипольные источники шума на глубине  $z_s = \lambda / 4$  ( $\lambda$  — длина волны) равномерно распределены вдоль отдельных направлений, угол между которыми  $\Delta\beta$ . (Далее при моделировании  $\Delta\beta = 10^\circ$ ). Расстояние между источниками  $\Delta r = 1$  м. Тогда вычисление шумового поля, приходящего с направления  $l = \overline{1, L}$ , на гидрофоне  $q$ , находящимся на глубине  $z_{rq}$ , сводится к суммированию звуковых волн, создаваемых каждым источником вдоль трассы  $l$  с полярной координатой  $\beta_l = \Delta\beta(l - 1)$ :

$$P_{\text{noise}}(z_{rq}, \beta_l) = \sum_{j=1}^J \exp(ib_j) (ns_{j,l}) \sqrt{S_{\text{area},j}} P(z_{rq}, r_j, z_s, \beta_l). \quad (1)$$

Здесь  $J$  — количество источников шума вдоль каждого направления  $l$ ,  $ns_{j,l}$  — интенсивность шумовых источников (*noise source intensity*) на единицу площади поверхности ( $ns_{j,l}^2 = 10^{\frac{WSL_{j,l}}{10}}$ ,  $WSL_{j,l}$  — уровень шума ветрового волнения отдельного источника (*Wind Source Level*) в каждой ячейке с площадью  $S_{\text{area},j}$ , дБ отн. 1 мкПа<sup>2</sup> / (м<sup>2</sup> Гц)),  $S_{\text{area},j} = \Delta r \Delta\beta r_j$  — площадь отдельного элемента сектора, с помещенным в нем источником на расстоянии

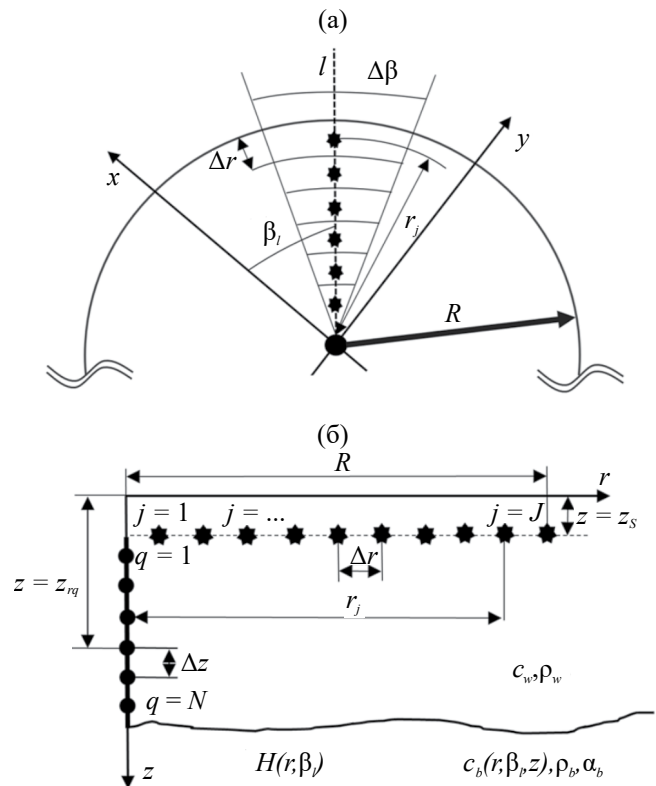


Рис. 1. Модель расчета подводного шумового поля: (а) — в горизонтальной плоскости; (б) — в вертикальной плоскости.

$r_j$  от приемника;  $b_j$  — распределенная равномерно случайная величина в диапазоне от 0 до  $2\pi$ , задающая случайное распределение фазы источников.

Комплексная величина  $P(z_{rq}, r_j, z_s, \beta_l)$  рассчитывается по формуле:

$$P(z_{rq}, r_j, z_s, \beta_l) = \frac{\Psi(z_{rq}, r_j, z_s, \beta_l) e^{-ik_w r_j}}{\sqrt{r_j}}, \quad (2)$$

где  $k_w = \frac{2\pi f}{c_w}$  — волновое число в водном слое, а

$\Psi(z_{rq}, r_j, z_s, \beta_l)$  — комплексная амплитуда, рассчитанная с помощью метода широкоугольного параболического уравнения [14].

Введем далее нормировочный коэффициент:

$$P_{\text{noise}}^{\text{coeff}}(z_{rq}, \beta_l) = \exp(ib_l) (ns_{l,l}) \sqrt{S_{\text{area},1}} P(z_{rq}, r_0, z_s, \beta_l).$$

Тогда средняя по глубине нормированная составляющая интенсивности шумового поля, связанная с источниками, расположенными по направлению с номером  $l$ , вычисляется на основе принципа взаимности, применимость которого обуславливается результатами, полученными в работе [7].

$$I(\beta_l) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{q=1}^N |P_{\text{noise}}(z_{rq}, \beta_l)|^2}{\sum_{q=1}^N |P_{\text{noise}}^{\text{coeff}}(z_{rq}, \beta_l)|^2}, \quad (3)$$

где  $N$  — количество гидрофонов на антенне,  $z_{rq}$  — глубина гидрофона с номером  $q$  (см. рис. 1б). Отметим здесь, что величина  $I(\beta_l)$  фактически представляет собой диаграмму направленности шума в горизонтальной плоскости.

Результирующее шумовое поле по всем выбранным направлениям:

$$P_N(z_{rq}) = \sum_{l=1}^L \exp(ia_l) P_{\text{noise}}(z_{rq}, \beta_l), \quad (4)$$

где  $a_l$  — случайная величина, распределенная равномерно (аналогично  $b_j$ ).

Для анализа влияния неоднородностей в структуре дна на направленность шума распределенных источников рассчитываются усредненные диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях для 300 реализаций, поскольку каждый источник шума  $j$  имеет случайную компоненту фазы  $a_j$  и  $b_j$  (см. (1) и (4)). Вертикальная диаграмма направленности шума находилась по формуле:

$$D(\theta) = 10 \log_{10} (S(\theta)^2 / S^{\text{coeff}}(\theta)^2),$$

где  $S(\theta)$  — модуль отклика вертикальной антенны, перегораживающей весь водный слой, и  $S^{\text{coeff}}(\theta)$

нормировочный коэффициент, рассчитанный для  $P_{\text{noise}}^{\text{coeff}}(z_{rq}, \beta)$ :

$$S(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N [P_{\text{noise}}(z_{rq}) \exp(-ik_w (q-1) \Delta z \sin(\theta))] \right|.$$

Здесь  $\theta$  — угол компенсации вертикальной антенны, отсчитываемый от горизонтального направления;  $\Delta z = 1$  м — расстояние между гидрофонами.

При построении вертикальных и горизонтальных диаграмм данные дополнительно нормируются по минимальному (или близкому к минимальному) значению интенсивности, общему для всех кривых (вертикальных либо горизонтальных диаграмм) согласно формулам

$$\begin{aligned} I'(\beta) &= I(\beta) - I_{\text{min}}, \\ D'(\theta) &= D(\theta) - D_{\text{min}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В случае сосредоточенного источника шума (судна), находящегося на расстоянии  $r$ , вместо выражения (1) используется формула (3):

$$P_{\text{noise}}(z_{rq}, \beta) = s P(z_{rq}, r, z_s, \beta), \quad (6)$$

где  $s^2$  — интенсивность сосредоточенного шумового источника (*source intensity*) на расстоянии 1 м

( $s^2 = 10^{\frac{SSL}{10}}$ ,  $SSL$  — уровень шума судна (*Ship Source Level*), дБ отн. 1 мкПа<sup>2</sup>/Гц),  $z_s$  — глубина сосредоточенного источника,  $\beta$  — угловая координата источника. При моделировании шумового поля сосредоточенного источника не учитываются случайные фазы, что связано с исследованием в данной работе средних характеристик излучаемых компонент сигнала.

Здесь нормировочный коэффициент имеет вид:

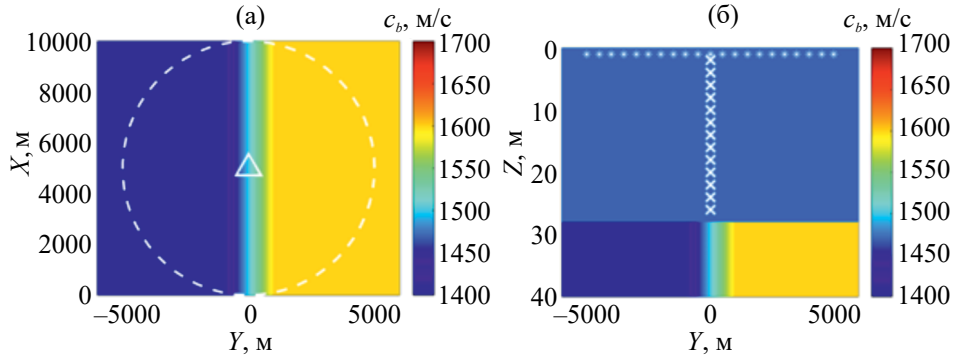
$$P_{\text{noise}}^{\text{coeff}}(z_{rq}, \beta) = s P(z_{rq}, r_0 = 100 \text{ м}, z_s, \beta).$$

## 2. ИДЕАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВОЛНОВОДА

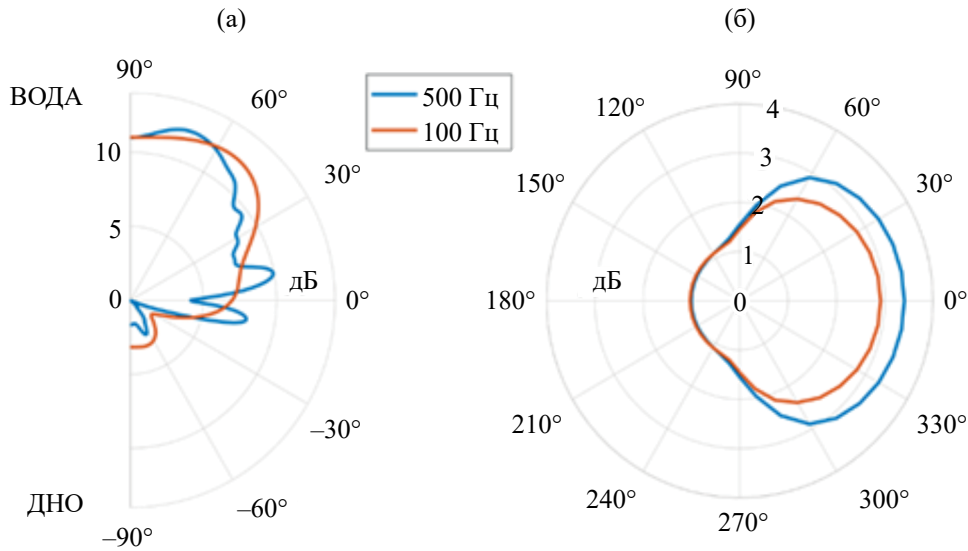
В рамках идеализированной модели волновода скорость звука в дне меняется по кусочно-линейному закону вдоль координаты  $y$

$$c_b(Y) = \begin{cases} 1400 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ при } Y < -1000 \text{ м}, \\ (1500 + 0.1Y) \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ при } -1000 \leq Y \leq 1000 \text{ м}, \\ 1600 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ при } Y > 1000 \text{ м}. \end{cases}$$

При этом водный слой имеет постоянную глубину  $H = 28$  м, скорость звука  $c_w = 1470$  м/с и



**Рис. 2.** Идеализированная модель волновода с переходной областью: (а) — в горизонтальной плоскости; (б) — в вертикальной плоскости. Треугольником и крестиками обозначено положение приемной цепочки. Пунктирной кривой и звездами, соответственно, — границы шумовой области и шумовые источники.

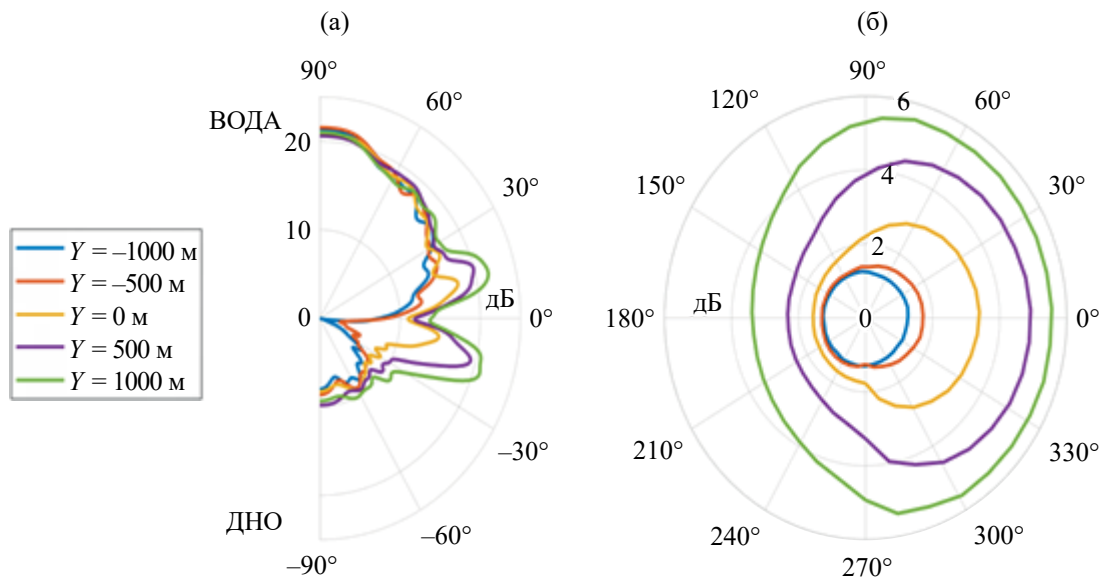


**Рис. 3.** (а) — Диаграммы направленности шумового поля распределенных источников в вертикальной плоскости  $D'(\theta)$ ; (б) — диаграммы направленности в горизонтальной плоскости  $I'(\beta)$  для двух спектральных компонент шума 100 и 500 Гц при расположении антенны в центре переходной области. На правом рисунке нормировка (5) проводилась на минимальное значение с последующим добавлением 1 дБ.

плотность  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Плотность дна и коэффициенты затухания также постоянны и соответственно равны  $\rho_b = 1850 \text{ кг/м}^3$  и  $\alpha_b = 0.33 \text{ дБ/л}$ . Отдельно отметим, что изменение скорости звука в дне имеет место только в переходной области шириной 2000 м (см. рис. 2). Вне этой области скорость звука считается постоянной. Для двух тональных компонент 100 и 500 Гц выбран радиус шумовой области  $R = 5000 \text{ м}$  (пунктирная окружность на рис. 2а). (Предварительный анализ в рамках однородных волноводов с аналогичным значением скорости звука в воде и постоянной скоростью звука в дне  $c_b = 1600 \text{ м/с}$  показал, что на частоте 100 и 500 Гц интенсивность на приемной

системе с увеличением радиуса  $R > 5000 \text{ м}$  меняется слабо.) Приемная акустическая система расположена в центре переходной области. Здесь и далее уровень шума распределенных источников в (1)  $WSL_{j,l} = WSL = 50 \text{ дБ}$  отн.  $1 \text{ мкПа}^2 / (\text{м}^2 \text{ Гц})$  [15], что соответствует скорости ветра 5–8 м/с.

На рис. 3 представлены нормированные диаграммы направленности шума в горизонтальной  $I'(\beta)$  (рис. 3б) и вертикальной  $D'(\theta)$  (рис. 3а) плоскостях для двух частот. Наличие изменения скорости звука в дне приводит к увеличению энергии, приходящей из области, где скорость звука в дне больше (см. рис. 3б). Однако величина изменения достаточно мала и не превышает 3 дБ. При этом



**Рис. 4.** (а) — Диаграммы направленности в вертикальной плоскости  $D'(\theta)$ ; (б) — диаграммы направленности в горизонтальной плоскости  $I'(\beta)$  для компоненты шума 500 Гц при расположении антенны в точках с координатами  $Y = -1000, -500, 0, 500, 1000$  м. На правом рисунке нормировка (5) проводилась на минимальное значение с последующим добавлением 1 дБ.

для частоты 100 Гц отличие менее существенное, что связано с большей глубиной проникновения звука в дно, а следовательно, и с вытеканием энергии из водного слоя в области высокоскоростного дна. Из результатов моделирования на рис. 3а видно, что для обеих частот основной вклад в результирующее поле находится в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (амплитуда сигнала, приходящего сверху, превышает соответствующую амплитуду, приходящую снизу, на 8 дБ).

На рис. 4 представлены нормированные средние по глубине горизонтальные  $I'(\beta)$  и вертикальные  $D'(\theta)$  диаграммы направленности для частоты 500 Гц при перемещении вертикальной антенны поперек переходной области. На рис. 4а заметно влияние скорости звука в дне на рост вклада дальних шумовых источников в диапазоне углов от  $[-30^\circ, 30^\circ]$ , что и приводит к существенной анизотропии в вертикальной плоскости. При этом для горизонтальной диаграммы изменение характеристик дна приводит к увеличению интенсивности вдоль направления с большей скоростью звука в дне на величину не более 4 дБ. Азимутальная анизотропия шумового поля проявляется слабо — на величину менее 3 дБ. Результаты моделирования средней интенсивности по глубине и направлению при различных положениях антенны на рис. 2 представлены в табл. 1. В случае расположения антенны на границе переходной области с акустически жестким дном средний уровень шума для исследуемых частот на 3.5 дБ больше, чем при размещении на границе с мягким дном.

**Таблица 1.** Средний уровень шума при разных положениях антенны.

Координата расположения антенны по $Y$ , м	-1000	-500	0	500	1000
Средняя интенсивность для 100 Гц, дБ	50.4	50.7	51.0	53.0	54.0
Средняя интенсивность для 500 Гц, дБ	52.3	52.5	53.3	54.6	55.8

### 3. РЕАЛИСТИЧНАЯ МОДЕЛЬ (КАРСКОЕ МОРЕ)

Модель построена на результатах трехмерной сейсморазведки в мелководной (глубина 30 м) области Карского моря (см. рис. 5а и работу [5]). Для указанной области свойственны сильные неоднородности в структуре дна, характеризующиеся большим разбросом скоростей звука в горизонтальной и вертикальной плоскостях (от 1470 до 1760 м/с) в пределах нескольких километров. Особое внимание следует обратить на водоподобные участки, где скорость звука в дне близка к скорости звука в воде  $c_b \approx c_w$ . Заметим также, что пробное бурение в указанной области не выявило регулярной зависимости плотности морского дна от глубины. Средняя плотность морского дна оказалась равной  $\rho_b = 1850 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент затухания звука в дне полагался постоянным и равным  $\alpha_b = 0.33 \text{ дБ/л}$ . Радиус шумовой области предполагался  $R = 5000 \text{ м}$ .

Таблица 2. Средний уровень шума при различных параметрах дна в Карском море.

Тип дна	Водоподобное дно	Промежуточный тип дна	Жесткое дно
Средняя интенсивность на частоте 100 Гц, дБ	50.3	51.5	54.9
Средняя интенсивность на частоте 500 Гц, дБ	49.8	50.2	52.6

### 3.1. Распределенные шумовые источники

При моделировании шумового поля ветрового волнения в одном из районов Карского моря были выбраны три круговые области с различными характеристиками дна: 1) высокая скорость звука в дне, глубина в центре  $H = 32$  м (на рис. 5а отмечена бордовым цветом); 2) со скоростью, близкой к скорости звука в воде и глубиной в центре  $H = 28$  м (темно-синяя область); 3) промежуточный тип дна, глубина в центре  $H = 28$  м (зеленый цвет). На рис. 5г и 5д изображены нормированные  $I'(\beta)$  для частот 100 и 500 Гц, соответственно. Вдоль некоторых выделенных направлений разница может существенно отличаться (до 5–6 дБ), что связано с азимутальной зависимостью свойств дна. В области, ограниченной бордовым цветом, присутствует уклон дна в направлении  $\beta = 90^\circ$ , что также приводит к увеличению интенсивности с данного азимута. На рис. 5б и 5в представлены вертикальные нормированные диаграммы направленности  $D'(\theta)$ . На более высокой частоте анизотропия шумового поля в вертикальной плоскости слабо зависит от типа дна. В случае жесткого и промежуточного типа дна влияние дальних источников заметнее, чем в случае водоподобного дна. Особенности донной структуры имеют ограниченное влияние на средний уровень шума в области, как это показано в табл. 2. Данные результаты хорошо согласуются с полученными при анализе упрощенной модели. Следует отметить, что более низкие частоты чувствительнее к параметрам дна, как это уже было отмечено при исследовании идеализированной модели. На приемной антенне, расположенной в точке с акустически жестким дном, при частоте излучения 100 Гц уровень шума в среднем на 4.6 дБ больше (см. табл. 2), чем на аналогичной антенне, находящейся в точке с низкоскоростными осадками. В случае  $f = 500$  Гц эта разница снижается до 2.8 дБ.

### 3.2. Сосредоточенный шумовой источник

Теперь рассмотрим влияние неоднородностей в структуре дна, близкой к реальной, на шумовое поле точечного приповерхностного источника на глубине  $z_s = 6$  м, моделирующего шум судна. В центре исследуемых областей, обозначенных на рис. 5а кругами, как и ранее расположена приемная вертикальная антенна, а источник удаляется на различные расстояния вдоль разных направлений. Данный численный эксперимент проводится поочередно для каждого азимутального направления.

Для той же спектральной компоненты шума 100 Гц, исходящего от источника (судна), движущегося в направлении от приемника с постоянной скоростью и оборотами двигателя, построены графики спада интенсивности от расстояния до приемной антенны (рис. 6). Уровень шума на сосредоточенном источнике в (3) полагался равным  $SSL \approx 167$  дБ отн.  $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$  [16]. Очевидно, что свойства дна в области, в которой находится локальный источник, играют весомую роль в потерях в интенсивности. На рис. 6 разница между трассами с наибольшим и наименьшим затуханием составляет около 80 дБ, причем в рамках одной водоподобной области она достигает 50 дБ, что подчеркивает наличие резкого увеличения потерь при приближении значений скорости звука в дне к скорости звука в воде<sup>1</sup>. Подобная закономерность наблюдается даже на частоте 500 Гц, но уже не столь явно ввиду сокращения глубины проникновения в дно звуковой волны с ростом частоты и сопутствующего уменьшения затухания.

Далее в рамках численных экспериментов с целью проверки возможности обнаружения водоподобных участков дна (например, в рамках подхода ship of opportunity [17]) исследуются отдельные спектральные компоненты шума от судна, движущегося вдоль и поперек водоподобной области (рис. 7а, 7б). При движении вдоль области наблюдается локальный минимум амплитуды шумового поля (см. рис. 7в). Глубина этого минимума уменьшается с ростом частоты. Отдельно отметим, что такое спадание амплитуды на 8 дБ имеет место даже при сокращении расстояния до приемной акустической системы. При движении по трассе, пересекающей водоподобную область, особый интерес представляют осцилляции амплитуды первой волноводной моды и полного поля, начиная с расстояния около 3 км. После прохождения судном низкоскоростного участка дна в водном слое в точке расположения приемной антенны остается только первая энергонесущая мода [6], а наблюдаемые осцилляции обусловлены межмодовым взаимодействием над неоднородной областью дна [10]. При этом амплитуда и пространственный период осцилляций уровня шума зависят от частоты источника звука и положения водоподобной области. Результаты представленных в работе численных экспериментов демонстрируют

<sup>1</sup> Заметим, что этот факт соответствует полученным ранее результатам моделирования с тональными сигналами [7].

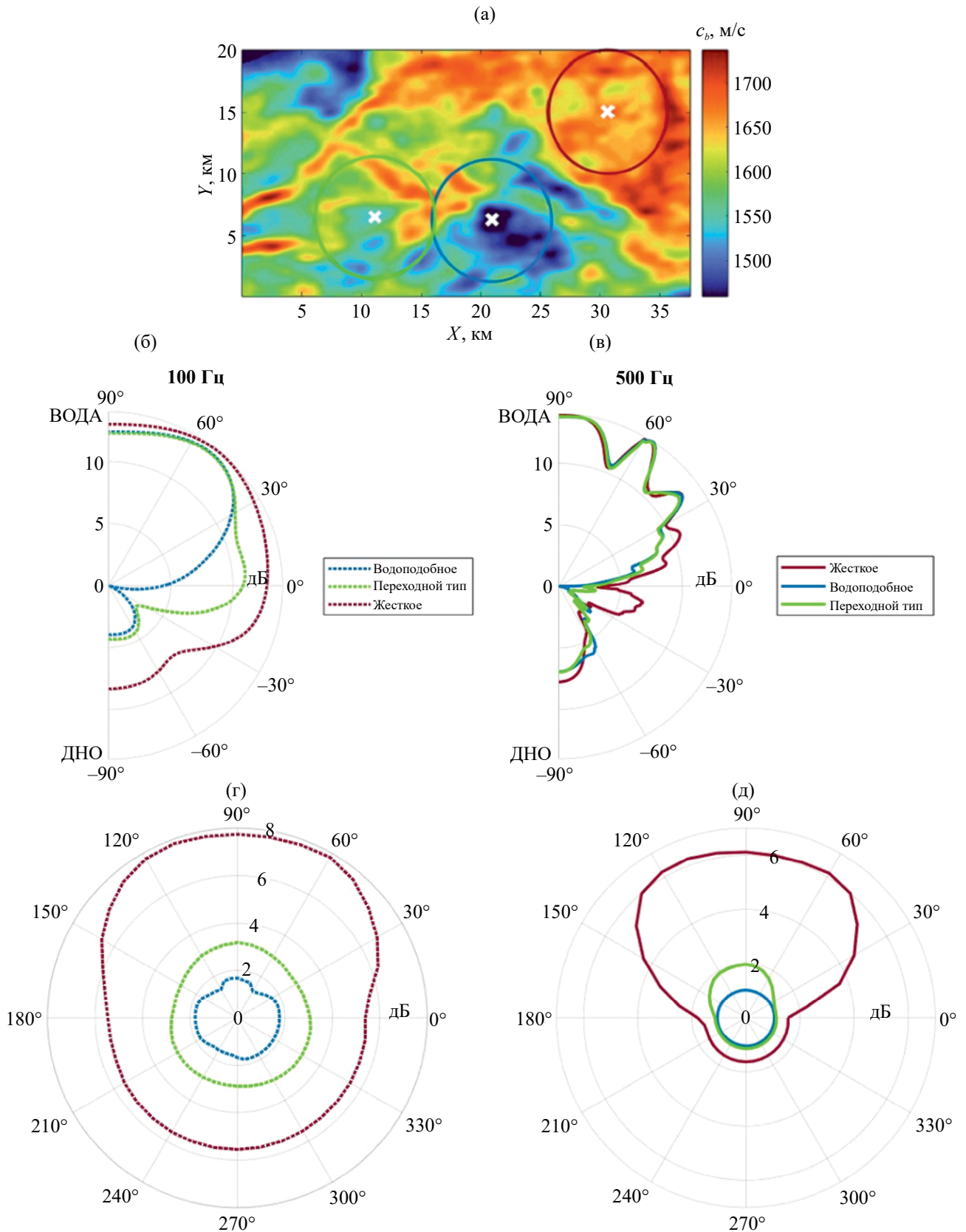
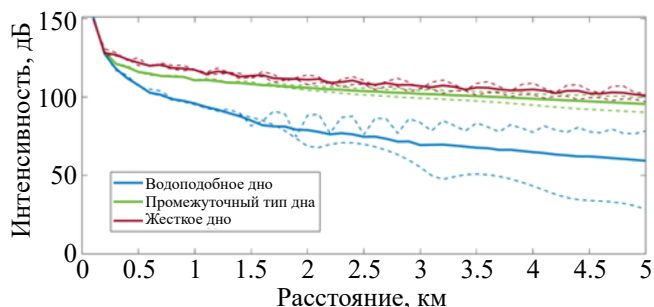


Рис. 5. (а) — Распределение скорости звука в дне на глубине 25 м от границы вода-дно. Вертикальные диаграммы направленности  $D'(\theta)$  для трех положений акустической приемной системы для двух частот приповерхностных источников: (б) — 100 Гц; (в) — 500 Гц. (г) и (д) —  $I'(\beta)$  для тех же частот и положений антенны.



**Рис. 6.** Спадание с расстоянием уровня шума судна (среднее значение по всем направлениям — сплошные линии и максимальный разброс возможных значений — штриховые линии) в областях с разными типами дна на частоте излучения 100 Гц. Цвет линии соответствует цвету кругов на рис. 5, выделяющих ту или иную область.

перспективность регистрации водоподобных областей в натурных экспериментах, что может быть полезно в задачах оперативной океанологии.

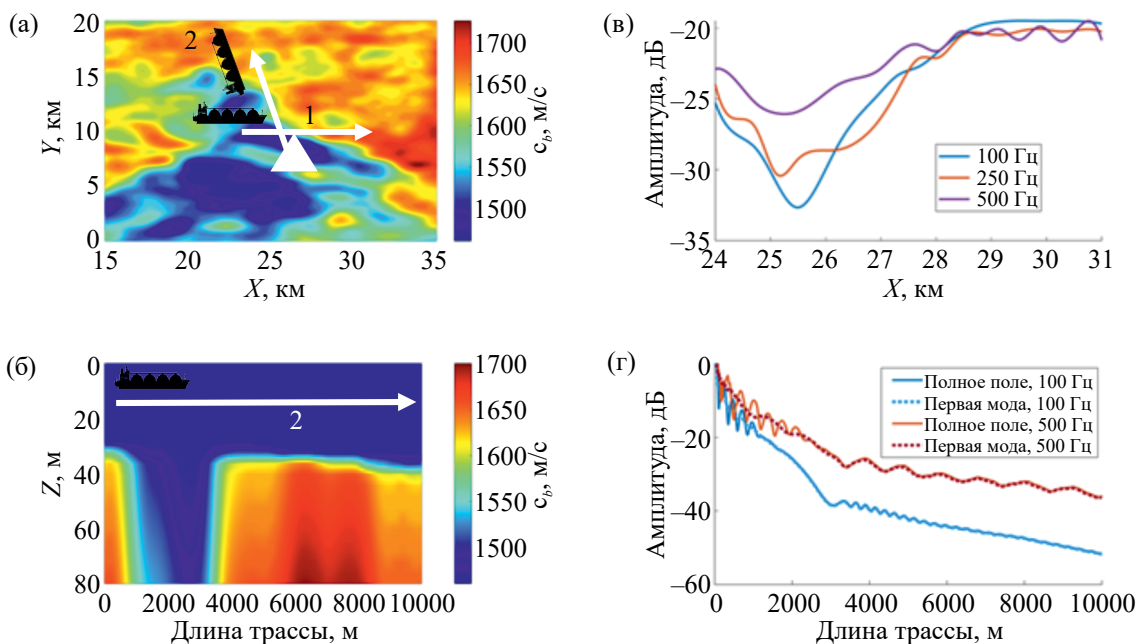
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках численного моделирования было продемонстрировано, что в мелком море акустическое поле окружающего шума зависит от пространственных неоднородностей в донной структуре. В случае распределенных шумовых источников

(модель ветрового волнения) наблюдается сильная анизотропия шумового поля в вертикальной плоскости и менее заметная в горизонтальной при фиксированной величине радиуса шумовой области. При этом средний по глубине уровень шума может отличаться на величину до 5 дБ в зависимости от скорости звука в дне в месте расположения приемной акустической системы при скорости ветра 5–8 м/с. Отметим, что примерно такой же разброс уровней вдоль разных направлений может быть связан с анизотропией поверхностного волнения [18].

В случае сосредоточенного источника шума (шум одиночного судна) его уровень спадает значительно быстрее в водоподобных областях мелководного района Карского моря, чем в областях с жестким дном. Разница в регистрируемом шуме на расстоянии 5 км от источника может достигать 80 дБ. В рамках численных экспериментов удалось оценить возможность регистрации водоподобных участков дна с помощью судна и вертикальной цепочки гидрофонов. Полученные результаты выявили специфику формирования акустических ландшафтов на арктическом шельфе, что важно при решении экологических и производственных задач в северных акваториях.

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



**Рис. 7.** (а) — Схема численных экспериментов при движении судна вдоль водоподобной области (по стрелке 1) и поперек (по стрелке 2), треугольником отмечено положение вертикальной цепочки гидрофонов; цветом обозначено распределение скорости звука в дне в горизонтальной плоскости на глубине 25 м от границы вода-дно; (б) — распределение скорости звука в вертикальной плоскости по стрелке 2, (в) — зависимость спектральной амплитуды шумового поля в точке расположения вертикальной цепочки гидрофонов от положения судна, двигающегося по стрелке 1, цифрами в рамке указаны соответствующие значения частоты спектральных составляющих; (г) — амплитуда первой моды и полного поля при пересечении судном водоподобной области (движение по стрелке 2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малащенко Б.М., Акчуринов Л.И. Проблемы и перспективы разработки нефтегазовых месторождений на арктическом шельфе Российской Федерации // Вестник Московского университета. Сер. 21. Управление (государство и общество). 2015. № 2. С. 49–64.
2. Газарян Ю.Л. Об энергетическом спектре шума в плоскостных волноводах // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 3. С. 382–389.
3. Аредов А.А., Дронов Г.М., Фурдуев А.В. Влияние ветра и внутренних волн на параметры шума океана // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 4. С. 581.
4. Ingenito F., Wolf S.N. Site dependence of wind-dominated ambient noise in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 85. № 1. P. 141–145.
5. 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.
6. Grigor'ev V.A., Lunkov A.A., Petnikov V.G. Effect of sound-speed inhomogeneities in sea bottom on the acoustic wave propagation in shallow water // Physics of Wave Phenomena. 2020. V. 28. P. 255–266.
7. Petnikov V.G. et al. Modeling underwater sound propagation in an arctic shelf region with an inhomogeneous bottom // J. Acoust. Soc. Am. 2022. V. 151. № 4. P. 2297–2309.
8. Yang T.C., Yoo K. Modeling the environmental influence on the vertical directionality of ambient noise in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1997. V. 101. № 5. P. 2541–2554.
9. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. New York: Springer, 2012. V. 1.
10. Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Лунков А.А. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 5. С. 608–619.
11. Зверев В.А. Избранные труды. Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2004.
12. Зверев В.А. Формирование изображений акустических источников в мелком море. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2019. 112 с.
13. Carey W.M., Evans R.B. Ocean ambient noise: measurement and theory. Springer Science & Business Media, 2011.
14. Collins M.D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 93. № 4. P. 1736–1742.
15. Wilson J.H. Wind-generated noise modeling // J. Acoust. Soc. Am. 1983. V. 73. № 1. P. 211–216.
16. Leigh C.V., Eller A.I. Dynamic ambient noise model comparison with Point Sur, California, in situ data // Contract. 2006. V. 24. № 02-D. P. 6602.
17. Heaney K.D. Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity // IEEE J. Oceanic Engineering. 2004. V. 29. № 1. P. 88–99.
18. Завольский Н.А., Раевский М.А. Горизонтальная анизотропия динамических шумов в глубоком и мелком море // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 2. С. 197–202.

## Characteristics of Low-Frequency Ambient Noise in Shallow Water with Heterogeneous Bottom Structure

S. D. Bodjona<sup>a,\*</sup>, D. D. Sidorov<sup>a,\*\*</sup>, V. G. Petnikov<sup>a,\*\*\*</sup>, A. A. Lunkov<sup>a,b,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

\*e-mail: bodjona@kapella.gpi.ru

\*\*e-mail: sidorov@kapella.gpi.ru

\*\*\*e-mail: petniko@kapella.gpi.ru

\*\*\*\*e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

The characteristics of low-frequency noise fields in shallow-water acoustic waveguides with a heterogeneous bottom structure in the presence of water-like areas are analyzed through numerical experiments. Two models of the seabed are considered: an idealized one with a linear change in the sound speed in the bottom along one of the Cartesian coordinates and a realistic one where the sound speed in the bottom depends on all three coordinates. The second model is close to the real situation in one of the shallow water areas of the Kara Sea. Noise fields from distributed near-surface sources (surface waves) and a point source (ship noise) are studied. Calculations are performed using the wide-angle parabolic equation method. Averaged horizontal and vertical directivity characteristics of the surface wave noise field are obtained, as well as average intensity values depending on the sound frequency and the position of the receiving vertical array. Directional diagrams of the local source noise level are constructed for bottom areas with different properties. The possibility of detecting areas with a water-like bottom by recording the noise of a moving vessel on a stationary vertical acoustic array is demonstrated. In the case of distributed sources, it is shown that the averaged noise characteristics weakly depend on the sound speed in the bottom.

**Keywords:** shallow water acoustics, heterogeneous bottom, surface waves, ship noise, wide-angle parabolic equation.